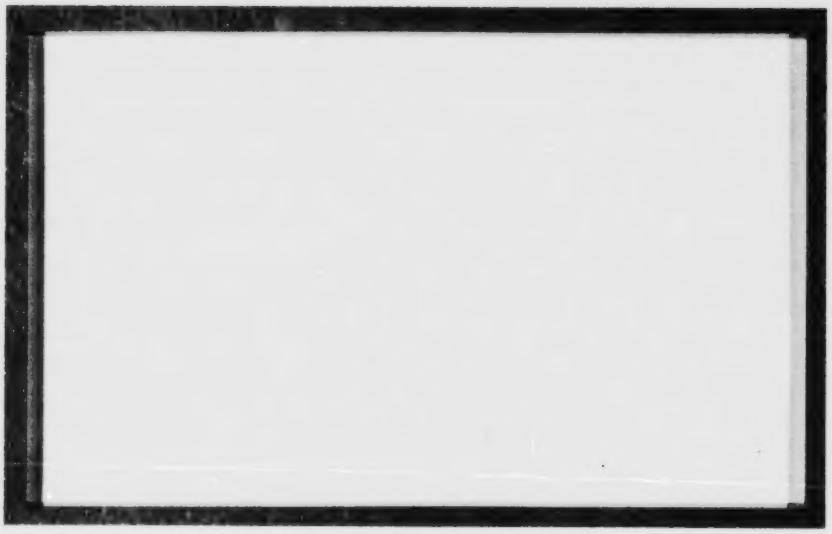
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL



CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

DÉTERMINATION DE LA DISPERSION DES PELOTONS EN FONCTION DU DÉBIT DE SATURATION

par

Serge Lefebvre*

* Département de Génie civil, École Polytechnique

Mémoire de M.Sc.A., département de Génie civil, École Polytechnique, dirigé par Karsten Baass.

Cette étude a été publiée grâce à une subvention du fonds F.C.A.R. pour l'aide et le soutien à la recherche.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #545
Août 1987

Dépôt légal - 4e trimestre 1987

SOMMAIRE

La littérature sur la coordination des feux révèle que le programme de simulation et d'optimisation TRANSYT est probablement le plus utilisé à travers le monde. Les résultats du programme dépendent toutefois de l'habileté du modèle probabiliste de Robertson à prédire la dispersion des pelotons.

Malgré les études effectuées sur sa calibration, le facteur de dispersion du modèle de prédiction est actuellement déterminé qualitativement parmi trois niveaux de friction représentant les caractéristiques externes de l'écoulement. De plus, certaines de ces études ont obtenu des résultats qui ne cadrent pas avec les trois valeurs suggérées dans TRANSYT. Par ailleurs, d'autres ont souligné les erreurs importantes qui peuvent découler de l'utilisation de cette relation qualitative.

Suite à l'analyse de ces observations, il semble que les erreurs sur les résultats dans TRANSYT ne seraient pas liées uniquement au choix qualitatif du facteur de dispersion et qu'une relation mathématique découlant d'études ne considérant que le type de rues ou d'artères ne solutionnerait pas nécessairement le problème. D'autres éléments non-étudiés jusqu'à maintenant interviendraient à un autre niveau.

En développant davantage le concept de friction actuel, on constate que la dispersion représentée par l'allongement de l'étendue du peloton est expliquée non seulement par les caractéristiques externes décrivant le site mais aussi par la friction interne du débit.

Par conséquent, le but de la présente étude est de déterminer la relation entre le facteur de dispersion du modèle de Robertson et la friction interne représentée par le débit.

Deux enquêtes et deux simulations avec un modèle d'analyse microscopique ont été réalisées sur la dispersion de pelotons de tailles différentes. L'analyse des résulats a permis de confirmer les hypothèses formulées sur la friction, à savoir; la dispersion croît avec l'augmentation du débit jusqu'à une valeur maximale correspondant à un rapport débit sur capacité de 0,6. En continuant d'augmenter les débits, une stabilité entre les voies s'installe causant la diminution de la dispersion. En variant la friction externe, la courbe de dispersion obtenue augmente selon le cas.

L'étude de la variation de l'amplitude de la dispersion pour différents sites permettra d'obtenir une relation entre la dispersion, le débit et la capacité. L'incorporation de cette relation dans le programme TRANSYT diminuera les pourcentages d'erreurs sur les résultats en éliminant le choix qualitatif.

ABSTRACT

The TRANSYT simulation and optimisation program is probably the most widely used traffic model in the world. However, its results are based on the ability of Robertson's dispersion model to predict platoon dispersion.

In spite of the studies on its calibration, the dispersion factor of the model is still determined in a qualitative manner. The choice proposed in the prcgram is based on three friction levels describing the external conditions of the traffic flow. Some of these studies reveal problems concerning the qualitative relationship.

Following the analysis of these observations, the external friction can explain only part of the dispersion of a platoon. We must consider an other concept which is the internal friction of a platoon. Thus, the purpose of this study is to determine the relationship between the dispersion factor of Robertson's model and the volume which characterizes the internal friction concept on arterial roads with low external friction.

Two experiments and two simulations on a microscopic model were conducted in order to verify the internal friction hypothesis. The analysis reveals that the dispersion increases with increasing volume up to a maximum value. Still increasing the volume, the dispersion decreases in an opposite way to the actual dispersion concept.

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a nécessité des rapports importants avec des personnes qui en ont facilité l'accomplissement. Je tiens donc à remercier le docteur Karsten Baass pour son intérêt à l'égard du sujet et ses conseils judicieux.

Je remercie également les étudiants de la section Génie des Transports pour leurs encouragements et Martin Hétu pour la compilation des données de la seconde enquête.

Enfin, je remercie ma compagne, Sylvie Michaud, pour son support moral et la motivation qu'elle m'a apportée tout au long de ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE iv

ABSTRACT vi

TABLE DES MATIERES viii

LISTE DES FIGURES xi

LISTE DES TABLEAUX xiii

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE 4

1.1 CONCEPTUALISATION DE LA DISPERSION DES PELOTONS 4

1.1.1 L'évolution de la régulation des feux 4
1.1.2 Les techniques de coordination des feux 6
1.1.3 La considération du phénomène de dispersion ... 8
1.1.4 Les programmes informatiques 9
1.1.5 La modèlisation du phénomène 10

1.2 MODELES DE REGRESSION 13

1.3 MODELE HYDRODYNAMIQUE OU CINETIQUE 18

1.4 MODELES PROBABILISTES 21

1.4.1 Le modèle de Pacey 22

a) Analyse des hypothèses de la théorie 24

1.4.2 Le modèle de Robertson 27

a) Historique 27
b) Développement théorique du modèle 31
c) Détermination du facteur F 37
d) Analyse des paramètres alpha et béta 38

CHAPITRE 2 PROBLEMATIQUE 41

CHAPITRE 3 OBJECTIF ET METHODOLOGIE 44

3.1 FORMULATION DES HYPOTHESES

3.1.1 Friction interne 45

3.2.1 Friction externe 48

3.2 SOUS-OBJECTIFS 50

3.3 METHODOLOGIE 50

CHAPITRE 4 ENQUETE SUR LA DISPERSION DES PELOTONS..... 54

4.1 ANALYSE DES DONNEES DES EXPERIENCES ANTERIEURES..... 54

4.2 CONCEPTION DE L'EXPERIENCE..... 56

4.2.1 Techniques d'enquête généralement utilisées... 56
4.2.2 Données à recueillir..... 57
4.2.3 Taille de l'échantillon..... 58
4.2.4 Choix et description de l'équipement..... 60
4.2.5 Adaptation de l'ordinateur aux besoins de l'enquête..... 62
4.2.6 Caractéristiques du site..... 62
4.2.7 Localisation des postes d'observation..... 63
4.2.8 Procédure pour la localisation et la sélection des sites..... 64
4.2.9 Périodes d'essais..... 65
4.2.10 Période d'enquête..... 67
4.2.11 Détermination des catégories de pelotons et de la durée de l'enquête..... 67
4.2.12 Procédure d'observation..... 67

4.3 TRAITEMENT DE L'INFORMATION..... 68

4.3.1 Transfert des données sur un PC..... 68
4.3.2 Procédure de validation des données..... 70

a) Validation du vert..... 70
b) Validation du véhicule de tête..... 70
c) Validation du nombre de véhicules dans le peloton..... 71
d) Résultats de la validation..... 73

4.3.3 Compilation par intervalle..... 74

a) Choix de l'intervalle de compilation..... 74
b) Agrégation des données..... 75
d) Statistiques sur la première enquête..... 76

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RESULTATS..... 77

5.1 PROCEDURE DE CALIBRAGE..... 77

5.2 CHOIX DU SYSTEME ET DU LOGICIEL D'ANALYSE..... 80

5.3 ELABORATION DU PROGRAMME DE CALIBRATION CALIBRA..... 82

5.4 ANALYSE DES RESULTATS POUR LE SITE A 82

5.4.1 Calibrage du facteur alpha en fonction des 4 groupes..... 82
5.4.2 Subdivision en sous-groupes..... 84

5.5 ANALYSE DES RESULTATS POUR LE SITE B..... 89

5.6 ANALYSE COMPARATIVE..... 91

5.7 UTILISATION DU MODELE DE SIMULATION MICROSCOPIQUE PLATSIM2..... 91

5.7.1 Description du modèle..... 91
5.7.2 Calibration du modèle..... 92
5.7.3 Simulation avec le modèle..... 93
5.7.4 Calibration du facteur alpha..... 93

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMENDATIONS..... 96

BIBLIOGRAPHIE..... 99

ANNEXE..... 105

LISTE DES FIGURES

1.1 Histogramme des arrivées à un carrefour..... 7

1.2 Dispersion d'un peloton sur une artère..... 11

1.3 Abaque de Lewis utilisé pour la coordination des feux en considérant la dispersion des pelotons..... 14

1.4 Courbe débit/densité..... 19

1.5 Diagramme espace/temps montrant la trajectoire des ondes 20

1.6 Distribution normale des vitesses..... 24

1.7(A) Profil du débit au poste A..... 33

1.7(B) Profil du débit au poste B..... 33

1.8 Résultats de l'étude de Robertson..... 38

1.9 Relation entre alpha et béta..... 39

3.1 Changement de voies en fonction du débit..... 47

3.2 Relation entre les frictions externes et internes et la dispersion 52

3.3 Méthodologie de l'étude..... 53

4.1 Dispersion des pelotons en fonction du débit de saturation..... 55

4.2 Variation de l'aire de dispersion en fonction de la distance 56

4.3 Détermination de la taille de l'échantillon..... 59

4.4 Les deux sites sélectionnés pour l'enquête..... 66

4.5 Procédure de validation..... 72

4.6 Pelotons éliminés ou corrigés par rapport à la taille des pelotons..... 73

5.1 Surface de l'erreur entre les distributions observées et simulées 79

5.2 Algorithme de recherche séquentielle utilisé dans le modèle calibra..... 81

5.3 Histogramme observé et distribution simulée au poste 300..... 84

5.4 Résultats de la calibration (site A)..... 85

5.5 Dispersion en fonction du débit (site A)..... 88

5.6 Dispersion en fonction du débit normalisé (site A)... 88

5.7 Dispersion en fonction du débit (site B)..... 90

5.8 Dispersion en fonction du débit normalisé (site A et B) 91

5.9 Dispersion en fonction du débit normalisé (simulations 1 et 2)..... 95

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Principaux programmes informatiques de coordination des feux..... 9

1.2 Modèles macroscopiques de dispersion..... 12

1.3 Pourcentage des véhicules demeurant dans la même étendue que le peloton initial..... 15

1.4 Etudes de régression sur la dispersion des pelotons..... 17

1.5 Choix suggérés dans TRANSYT pour la constante de dispersion alpha..... 30

1.6 Dynamique du modèle de Robertson..... 37

1.7 Etudes effectuées sur la calibration du modèle de Robertson 40

2.1 Valeurs de dispersion suggérées et valeurs obtenues pour des sites similaires..... 42

3.1 Concept de friction à deux dimensions..... 51

4.1 Fiche technique du Tandy 102..... 62

4.2 Caractéristiques des sites recherchés..... 64

4.3 Format de sortie des données..... 69

4.4 Nombre de véhicules par intervalle (2 s) par cycle..... 75

4.5 Statistiques sur la première enquête..... 76

5.1 Résultats de la calibration du premier site pour les 4 groupes..... 83

5.2 Erreurs générées par la subdivision des groupes (site A, poste 2)..... 86

5.3 Sensibilité du modèle à l'erreur générée par la subdivision..... 87

5.4 Résultats de la calibration de alpha en fonction de la grosseur des pelotons pour le site B..... 90

5.5 Résultats de la calibration des pelotons générés par les simulations 1 et 2..... 94

INTRODUCTION

La conjoncture résultant de l'augmentation des déplacements motorisés et de l'utilisation plus rationnelle de l'espace, incite l'optimisation de l'offre actuelle en transport. Cette tendance se reflète en circulation par le développement de modèles de simulation plus raffinés et plus réalistes.

Depuis la démonstration de l'importance de la dispersion des pelotons dans la coordination des feux par Hillier et Rothery (1967), le développement des programmes subséquents s'est effectué en tenant compte du phénomène. C'est le cas du programme de simulation et d'optimisation TRANSYT (1983) (TRAffic Network STudY Tool) qui est probablement le plus utilisé à travers le monde.

La prédiction des pelotons dans le programme est basée sur le modèle probabiliste de Robertson (1969). La synthèse des études effectuées sur la calibration du modèle a permis de dégager une relation qualitative entre la dispersion des pelotons et trois niveaux de friction correspondants aux caractéristiques externes de l'écoulement. Afin d'optimiser davantage les résultats, cette relation fut introduite dans le programme.

Toutefois, les résultats de certaines expériences effectuées sur la validité de cette relation ne cadrent pas avec les valeurs suggérées dans le programme. Par ailleurs,

Axhausen et Körling (1987) ont démontré que des erreurs importantes peuvent découler de ce choix qualitatif.

Dans la recherche de l'optimum en coordination des feux, la détermination de la dispersion des pelotons placés dans différentes situations est essentielle. Or, le niveau de connaissance actuelle ne permet pas d'atteindre cet objectif.

La réalisation d'une étude exhaustive sur toutes les variables affectant la dispersion permettrait d'obtenir la relation mathématique convoitée. L'erreur engendrée par le choix qualitatif ne justifie pas toutefois une étude de cette envergure.

Suite à ces remarques, d'autres avenues doivent être examinées concernant la calibration du modèle de Robertson afin d'optimiser l'offre actuelle. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude en se concentrant sur l'élaboration et la vérification d'hypothèses qui permettront d'arriver à une éventuelle relation mathématique, apportant des solutions plus réalistes au problème de coordination des feux. Ces hypothèses servent à définir une autre dimension au concept de dispersion actuel.

Jusqu'à maintenant, la dispersion a été étudiée en ne considérant que la friction correspondant au site. Or, puisque la dispersion est causée entre autres par les interactions entre les véhicules, elle peut également s'expliquer par la friction interne propre au débit.

Tout comme la friction externe, plusieurs variables influencent la friction interne. Cependant, pour enquêter sur la dispersion selon cette approche, le débit peut être la seule variable à mesurer pour une friction externe donnée si on considère qu'il représente toutes les autres variables.

Ainsi, la dispersion pour un type d'artère en particulier ne serait pas fixe comme le veut le concept actuel. Elle varierait plutôt en fonction du débit représentant la friction interne. L'amplitude de sa variation dépendrait alors du type d'artère sur laquelle elle est mesurée.

Pour comparer l'importance de la variation de la friction interne entre plusieurs sites, le débit doit être normalisé en considérant la friction externe ou la capacité du site.

Par conséquent, le but de la recherche est de déterminer la relation entre la dispersion du peloton et le débit pour une capacité donnée.

Avant d'élaborer le concept de friction interne, une analyse des différentes méthodes de dispersion est effectuée en accordant une attention particulière au modèle de Robertson (1969). Cette analyse a pour but de cerner la problématique actuelle en posant les hypothèses de solution à l'imbroglio actuel.

La démarche utilisée pour vérifier ces hypothèses est présentée au chapitre trois portant sur la méthodologie.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

1.1 CONCEPTUALISATION DE LA DISPERSION DES PELOTONS

1.1.1 L'évolution de la régulation des feux.

Au début du siècle, l'impressionnante poussée de la circulation motorisée, liée à la croissance démographique apportée par la révolution industrielle, contribuaient à l'éclatement des structures urbaines selon le processus traditionnel de l'adaptation de la ville à la société qui l'habite.

Dans ce contexte, la circulation motorisée était la pierre angulaire d'un développement urbain improvisé. L'incapacité de la ville de s'accomoder au rythme de croissance de celle-ci, résulta en une situation de crise tant en Europe qu'en Amérique. Les solutions proposées convergeaient toujours vers une utilisation plus grande de l'espace (Dagenais 83). Au centre-ville, où il était impossible d'accroître davantage le nombre de rues, on tenait les carrefours responsables des problèmes de congestion.

Le rapport Massard (Le Journal 1925) faisait état de cette situation en soutenant que le succès économique de la ville repose sur la vitesse des déplacements. Il proposait alors la construction d'autodromes aux carrefours pour

éviter les croisements avec les rues transversales. D'autres (Le Corbusier 1925), proposaient de diminuer le nombre de rues afin d'éviter les carrefours, sources des problèmes de congestion. La réponse aux problèmes de circulation se traduisait toujours par une intervention physico-spatiale quelconque.

Toutefois, l'apparition des premiers feux de circulation suggérait un compromis intéressant entre les problèmes de congestion créés par les carrefours et les solutions extravagantes de l'époque. Ainsi, en plus de leur fonction sécuritaire, ces derniers pouvaient être ajustés de façon à augmenter la capacité de l'intersection selon l'importance des débits en cause. Leur multiplication allait rapidement mettre en évidence l'interaction des feux séparés d'une faible distance en constatant que l'arrivée des véhicules à un carrefour dépend de leur sortie aux carrefours adjacents. Cette interaction amorça les premiers efforts réalisés sur la coordination des feux.

Le changement d'attitude face à l'utilisation de l'espace et les dangers de baser le développement sur l'automobile (rapport Buchanan, 1963) allaient alors accentuer davantage l'importance des moyens de contrôle aux carrefours, incitant le développement et l'amélioration des techniques de régulation.

Aujourd'hui, la régulation des feux concerne non seulement la sécurité et la capacité de l'artère mais aussi

la diminution des coûts sociaux générés par les effets indésirables comme la polution de l'air et du bruit, les retards et les arrêts dont Couture (1982) fait état. Le perfectionnement des moyens utilisés pour optimiser la régulation est de plus en plus important.

1.1.2 Les techniques de coordination des feux

Les techniques de coordination existantes sont regroupées essentiellement sous deux approches distinctes: la maximisation de la bande verte et la minimisation des retards par une fonction de désutilité.

La faiblesse de la première approche est attribuée à la non-considération de la dispersion des pelotons. Le profil du débit est considéré uniforme et les véhicules progressent sur l'artère avec une vitesse constante; ce qui est rarement observé en réalité. De plus, comme le souligne Baass (1982), il serait difficile, voire impossible, d'appliquer cette méthode pour d'autres cas que celui de l'artère.

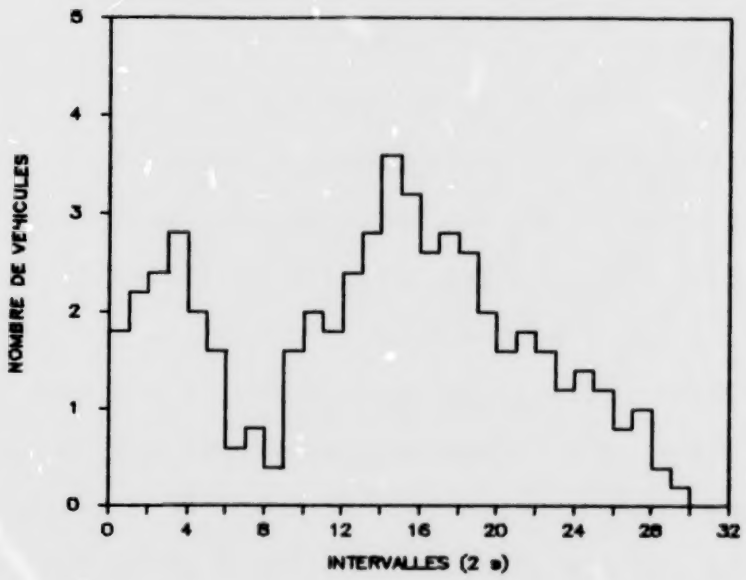
La seconde approche consiste à minimiser une fonction objectif constituée de différentes variables représentant des éléments indésirables, générateurs de coûts sociaux. Les retards aux carrefours sont produits par les véhicules qui ralentissent ou s'arrêtent à cause d'un décalage ou d'un phasage inadéquat. Pour obtenir le nombre de vehicules qui sont affectés et coordonner les feux en conséquence, la

connaissance du profil d'arrivée des pelotons est essentielle.

On utilise alors un histogramme montrant le nombre moyen de véhicules par intervalle pour représenter le phénomène (fig 1.1). Robertson (1974) discute des avantages de recourir à cet histogramme en indiquant les informations qu'on peut en retirer.

FIGURE 1.1

Histogramme des arrivées à un carrefour



Parce qu'elle est élaborée dans une perspective plus réaliste, la minimisation des retards produit de meilleur résultats. Le succès de la méthode dépend toutefois de son habilité à prédire la dispersion des pelotons.

1.1.3 La considération du phénomène de dispersion

Depuis que la volonté de contrôler les feux existe, une quantité impressionnante d'études sur la coordination a été réalisée. Selon Nemeth et Vecellio (1970), ce grand nombre d'études s'explique par le manque de connaissance du comportement des pelotons. Ce n'est que trente ans après l'implantation des premiers feux, soit à la fin des années cinquante qu'on commence vraiment à s'intéresser au phénomène de la dispersion, en s'interrogeant sur la distance maximale où il est encore bénéfique de coordonner deux feux.

Face à l'importance grandissante accordée à la coordination des feux et à l'ambiguïté apportée par le Traffic Engineering Handbook (1950) et le Manual on Uniform Traffic (1948) où l'un recommandait de coordonner jusqu'à 360 mètres et l'autre jusqu'à 760 mètres, Lewis (1958) entreprend ainsi une des premières études sur la dispersion.

Il conclut qu'un feu de circulation placé à une distance de 1045 mètres du point de formation du peloton peut être coordonné avec le feu en amont. Chenu (1961) démontre que 77% des véhicules du peloton initial sont encore groupés en peloton après 1600 mètres du point de départ. Ce n'est toutefois qu'en 1969 que Hillier démontre l'importance de tenir compte de ce phénomène dans la coordination.

1.1.4 Les programmes informatiques

Avec la technologie des ordinateurs, plusieurs programmes de simulation et d'optimisation de la circulation au carrefour, sur l'artère et sur le réseau ont été développés (tableau 1.1).

Tableau 1.1

Principaux programmes informatiques de coordination des feux

ANNEE	NOM	SOURCE	DISPERSION PELOTONS
1964	MAXBAND	MIT	non
1965	SIGART	FHWA	non
1965	COMBINAISONS	LONDON CONCIL	non
1965	SIGRID	Toronto	non
1966	SIGOP I	FHWA	non
1967	SIGPROG	FHWA	non
1969	TRANSYT	TRRL	oui
1969	COMBINATIONS	LONDON CONCIL	oui
1973	PASSER II	TEXAS DOT	non
1974	MITROP	FHWA	oui
1976	SIGOP II	FHWA	oui
1978	TRANSYT 6-C	BURKELEY UNI.	oui
1980	SCOOT	TRRL	oui
1980	SSTOP	TRANSPORT CANADA	oui
1982	SIGOP III	FHWA	oui
1984	PASSER 84	TEXAS DOT	non
1985	AAP-85	FLORIDA UNI.	oui

Avant l'élaboration du modèle de dispersion de Robertson (1967), aucun de ces programmes ne tenait compte de la dispersion des pelotons. L'importance de considérer ce phénomène dans la coordination des feux démontrée par Hillier (1967) a incité Robertson à développer un modèle de

dispersion et à l'incorporer dans le programme TRANSYT (1969).

Face aux succès de TRANSYT, la dispersion des pelotons fut alors prise en considération dans le développement de la majorité des programmes de circulation subséquents.

1.1.5 La modélisation du phénomène

L'interruption du flux de véhicules par les feux de circulation a pour effet de grouper les véhicules en pelotons. A la tombée du vert, ceux-ci quittent le carrefour aux conditions de saturation en se dispersant sur la rue où sur l'artère.

Si ce groupe se propage sur un tronçon non saturé, exempt de toute contrainte, la différence de vitesse entre les véhicules va permette aux plus rapides de distancer les plus lents. L'étendue du peloton s'allongera de façon uniforme dans ces conditions (fig 1.2).

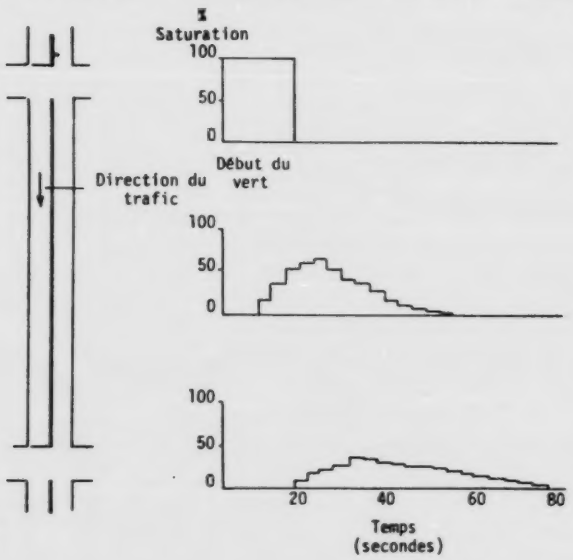
La réalisation d'événements aléatoires ou cycliques venant perturber le flux fera augmenter cette étendue. Par exemple, si on réduit la capacité du lien par l'intrusion de véhicules lourds, ceux-ci viendront gêner la course de certains véhicules en faisant allonger la queue du peloton. L'identification des éléments causant ou influençant la dispersion fera l'objet d'un chapitre ultérieur.

Les travaux sur la dispersion sont effectués dans le

but de connaître la façon dont se disperse un peloton afin de modéliser le phénomène, et ainsi, améliorer l'efficacité des techniques de coordination des feux.

FIGURE 1.2

Dispersion d'un peloton sur une artère



On distingue deux approches dans les études et l'analyse de la dispersion; l'approche macroscopique où l'on observe le peloton dans son ensemble et l'approche microscopique qui considère le comportement des véhicules pris individuellement.

Bien que la complexité du phénomène amène certains auteurs à ne considérer que l'aspect macroscopique (Hiroshi et Takashi, 1975), plusieurs modèles de simulation microscopique existent. Dans le présent travail, seulement l'aspect macroscopique est abordé.

Les études sur la dispersion consistent à modéliser le phénomène ou à améliorer les modèles déjà existants. On distingue trois types de modèles macroscopiques qui ont fait l'objet de ces études pour représenter la dispersion des pelotons (tableau 1.2).

L'analyse de ces différentes approches est effectuée aux sections suivantes. Puisque le modèle de prédiction utilisant la distribution géométrique de Robertson est le plus utilisé, l'emphase est davantage axée sur ce modèle.

TABLEAU 1.2

Modèles macroscopiques de dispersion

REGRESSION	HYDRODYNAMIQUE ET CINEMATIQUE	PROBABILISTE
Etudes des variables affectant la dispersion	Analogie du flux avec les lois de différents systèmes physiques	Utilisation des distributions mathématiques
- variables décrivant le flux - variables décrivant le site	- conservation de l'énergie - théorie des fluïdes - théorie cinématique des ondes	- normale - normale transformée - géométrique - rectangulaire

1.2 MODELES DE REGRESSION

Les modèles de régression sont développés à partir de l'étude du comportement des pelotons par rapport à une ou plusieurs variables. Les différentes relations mathématiques déterminées lors de ces études sont discutées ci-dessous.

Lorsque la distance séparant les carrefours est faible, la dispersion des pelotons est moins perceptible et la coordination des feux basée sur un peloton uniforme donne des résultats acceptables. Toutefois, si la distance est grande, la coordination devient moins efficace à cause du phénomène de dispersion qui prend place.

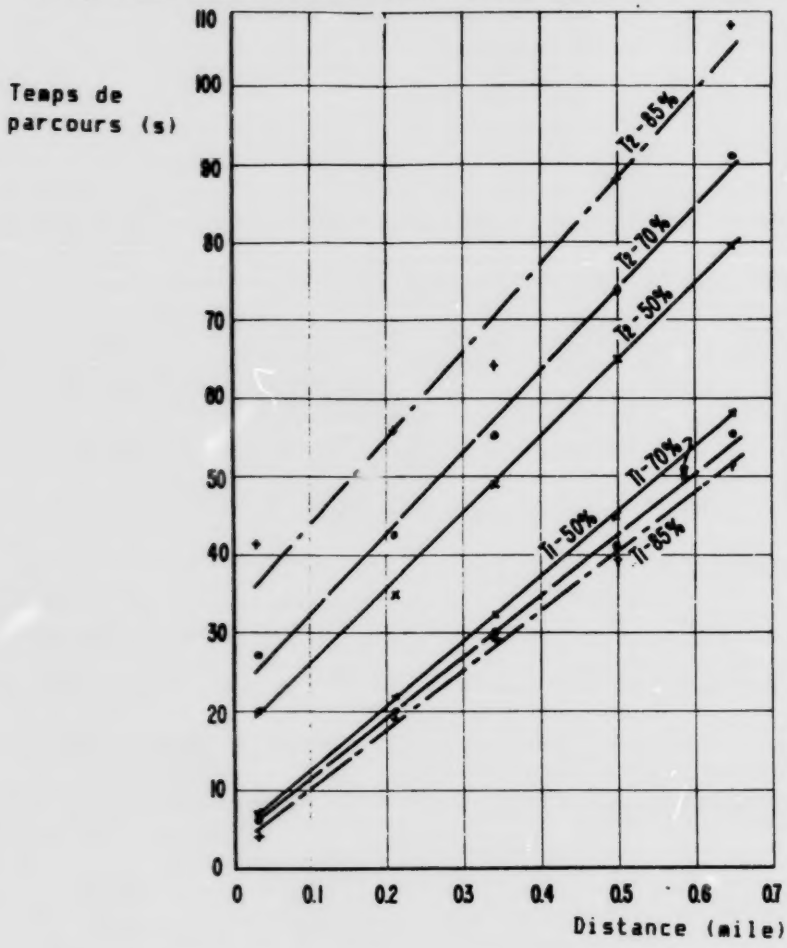
La détermination de la distance maximale entre deux carrefours où il est encore avantageux de coordonner est à l'origine des premiers efforts dirigés sur l'étude de la dispersion des pelotons. Ce n'est qu'à la fin des années cinquante qu'on trouve les premières études sur la dispersion des pelotons pouvant s'appliquer à la coordination des feux.

L'ambiguïté des distances recommandées à l'époque, a incité Lewis (1958) à effectuer une des premières études sur la dispersion en déterminant une relation entre la distance et l'étendue du peloton équivalent à 50%, 70% ou 85% du peloton initial (figure 1.3). Il proposa alors une méthode de coordination basée sur ce graphique. Lewis conclut qu'un feu placé à une distance de 1040 mètres d'un autre tire

avantage d'une coordination.

FIGURE 1.3

Abaque de Lewis utilisé pour la coordination des feux en considérant la dispersion des pelotons



Une seconde étude effectuée par Graham et Chenu en 1962 permet d'obtenir une autre relation entre la distance et la dispersion des pelotons. Ils démontrent ainsi qu'après 1,6 kilomètre, 77% des véhicules sont dans la même étendue qu'au départ (tableau 1.3).

TABLEAU 1.3

Pourcentage des véhicules demeurant dans la même étendue que le peloton initial

Distance (km)	Véhicules (%)
0,40	91
0,80	85
1,20	80
1,60	77

Ces deux expériences démontraient que pour des feux séparés par des distances importantes, l'arrivée des véhicules au carrefour en aval ne s'effectue pas au hasard et qu'on peut ainsi tirer avantage de la coordination. Toutefois les résultats obtenus lors de ces expériences ne sont valables que pour des sites présentant les mêmes conditions de circulation.

En 1967, Dockerty étudie la variation de la dispersion des peloton à 61 mètres et 244 mètres de la ligne d'arrêt sur deux sites. Il obtient le modèle de régression suivant correspondant aux données de son expérience:

$$T_2 = 1,1(T_1) + 1,5$$

où

T_2 : étendue à 244 mètres
T_1 : étendue à 61 mètres

Encore une fois, ces résultats ne sont valables que pour des conditions de circulation identiques à celles de l'expérience.

Nemeth et Vecellio (1970) entreprennent une étude sur les effets de la distance entre les carrefours et ceux de la taille des pelotons sur la dispersion. Le faible échantillonnage n'a pas permis d'obtenir des résultats significatifs, rendant impossible l'établissement d'un modèle de regression.

Cependant, une étude plus exhaustive a été réalisée par Treiterer et al. (1973). Le but était d'analyser le comportement des pelotons sur deux artères urbaines à sens unique par rapport aux variations des feux de circulation et des débits. Les principales variables affectant le comportement des pelotons étaient identifiées comme étant l'espacement entre les feux, le décalage et la taille du peloton.

Les résultats ont permis le développement d'un modèle mathématique pouvant simuler le comportement d'un peloton sur une artère avec plusieurs carrefours en coordonnant les feux en conséquence.

Comme il est souligné dans les recommandations d'un article de Vecellio (1976), d'autres études sont nécessaires afin d'améliorer le modèle et d'élargir son champ d'application. Toutefois, la quantité d'études requise pour obtenir un modèle de simulation basé sur différentes variables affectant la dispersion est considérable. De plus, l'utilisation du modèle exigerait énormément de données.

Devant ces lacunes, l'idée de poursuivre le

développement d'un modèle de régression fut abandonnée. La recherche se consacra davantage sur le perfectionnement du modèle probabiliste de Robertson. Ceci expliquerait pourquoi les études de régression sur la dispersion se sont terminées en 1973 (tableau 1.4)

TABLEAU 1.4

Etudes de régression sur la dispersion des pelotons

REFERENCE	RELATION OBTENUE
Lewis (1958)	étendue (temps) en fonction de la distance et du % des véhicules dans le peloton
Graham (1963) et Chenu	% des véhicules dans le peloton en fonction de la distance
Dockerty (1967)	étendue à 244 mètres de la ligne d'arrêt en fonction de l'étendue à 61 mètres
Vecellio (1970) et Nemeth	données insuffisantes
Treiterer (1973)	famille d'équations de régression incorporée dans un modèle de simulation de pelotons sur une artère à sens unique

1.3 MODELE HYDRODYNAMIQUE OU CINEMATIQUE

La correspondance entre différents systèmes physiques est parfois évidente par la similitude des lois qui les régissent. Les théories d'un système peuvent alors être utilisées pour expliquer certains phénomènes observés dans un autre système où le niveau des connaissances est moins élevé.

C'est ainsi que les similitudes entre les ondes de choc retrouvées en mécanique des fluides et les comportements du flux de véhicules observés en circulation ont incité Lighthill et Whitham (1955) à transposer les connaissances d'un système à l'autre, dans le but d'expliquer certains phénomènes de circulation.

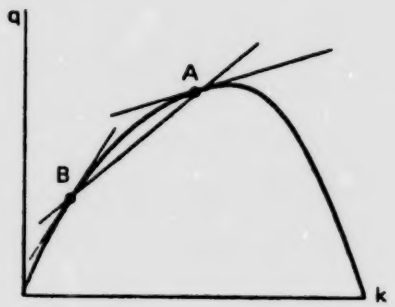
Par définition, une onde de choc représente le déplacement ou la propagation d'un changement aux niveaux de la densité et du débit (Streeter, 1977). Le même phénomène peut être observé en circulation lorsque qu'un débit q_A d'une densité k_A rencontre un débit q_B d'une densité k_B. L'onde de choc résultante se déplacera avec une vitesse U vers l'arrière ou vers l'avant du peloton selon le cas. Elle sera donnée par la relation suivante:

$$U=(q_B-q_A)/(k_B-k_A)$$

L'onde de choc représente la pente de la corde reliant les points A et B sur la courbe débit/densité alors que la pente de la tangente à ces points représente la vitesse des ondes (figure 1.4).

FIGURE 1.4

Courbe débit/densité

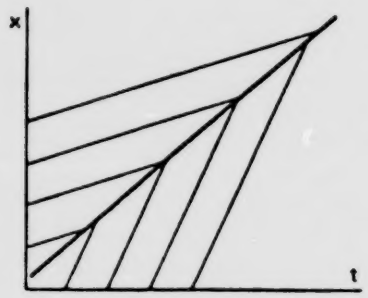


Pour prédire la dispersion des pelotons à l'aide de cette méthode, il s'agit en premier lieu d'obtenir la relation entre le débit et la densité sur le site étudié. A partir de la courbe débit/densité et du profil du peloton observé à la ligne d'arrêt, un diagramme espace/temps montrant la trajectoire des ondes et de l'onde de choc résultante est alors dérivé selon la méthode décrite par Lighthill et Whitham (1955) (fig 1.5).

En faisant l'hypothèse que la relation débit/densité est constante sur toute la longueur du lien, le profil des arrivées aux différents postes d'intérêt peut alors être prédit.

FIGURE 1.5

Diagramme espace/temps montrant la trajectoire des ondes



Trois faiblesses caractérisent le modèle;

- la dépendance de la méthode face à la relation débit/densité.
- l'étendue du peloton n'augmente pas selon cette méthode.
- le modèle s'applique seulement sur des routes très longues et congestionnées.

Pacey (1955) et Seddon (1972) ont expérimenté ce modèle de prédiction des pelotons. Pacey a obtenu de meilleurs résultats avec son propre modèle et Seddon est arrivé à la conclusion que la théorie de la cinématique des ondes (ou l'hydrodynamique) est intéressante surtout d'un point de vue théorique.

Michalopoulos et Pisharody (1980) ont développé davantage la théorie en l'appliquant à la contraction du peloton. Toutefois, aucune expérience pratique n'a été effectuée concernant cette approche.

1.4 MODELES PROBABILISTES

Une autre approche utilisée pour prédire la dispersion des pelotons est de faire appel aux modèles probabilistes déjà existants. A l'aide de données expérimentales, on peut alors vérifier si une distribution explique le phénomène et la calibrer pour optimiser les résultats. C'est ainsi que Pacey (1955) a obtenu la distribution normale transformée des temps en posant comme hypothèse que la vitesse des véhicules dans le peloton est distribuée selon une loi normale.

Robertson (1969) développe un modèle empirique qui représente la distribution géométrique. Elle doit cependant être ajustée en fonction des caractéristiques de la circulation afin de produire des résultats représentatifs de la réalité.

Rumsey (1972) démontre toutefois que le choix d'une distribution a peu d'impacts sur les résultats lorsqu'il s'agit d'obtenir le retard moyen ou la longueur moyenne de la file d'attente au carrefour. Mais, dans le cas où il faut obtenir précisément le profil d'arrivée, le choix de la distribution est important.

Le temps de calculs que nécessitaient à l'époque ces simulations, était un critère important dans le choix d'une distribution. L'étude de Rumsey (1972) a donc incité Tracz (1975) à considérer davantage la distribution rectangulaire

en l'évaluant par rapport aux distributions normale, normale transformée et géométrique. De bons résultats furent trouvés mais aucune étude subséquente n'a été réalisée dans le but de confirmer les travaux de Tracz.

Dixon (1972) tente de déterminer sans succès entre les distributions normale et normale transformée celle qui se rapproche le plus de la situation réelle en appliquant le test du khi-deux.

De tous les modèles de prédiction étudiés, ce sont les distributions géométrique et normale transformé qui ont suscité le plus d'intérêt de la part des chercheurs. Toutefois, l'implantation de la distribution géométrique dans le programme TRANSYT a fait converger davantage la recherche sur cette distribution. Pour ces raisons, nous allons étudier ces deux distributions en mettant l'emphase de l'analyse sur le modèle de Robertson.

1.4.1 Le modèle de Pacey

Au milieu des années 50, Pacey (1955) effectue une série d'observations concernant la dispersion des pelotons à deux endroits différents en aval d'un carrefour signalisé. Le but de l'expérience était d'évaluer les résultats obtenus en comparant sa théorie à celle de Lighthill et Whitham (1955) pour des conditions de circulation différentes. L'analyse qualitative des profils des pelotons simulés par

rapport à ceux obsevés permettait de conclure sur la valeur des deux méthodes.

Puisque le modèle suppose l'abscence d'interaction entre les véhicules, les résultats de la simulation sont très représentatifs des conditions de circulation, où le nombre de véhicules dans le peloton est faible par rapport au nombre maximum possible. Cette hypothèse limite le champ d'application du modèle et le rend moins attrayant, si on considère que les bénéfices de la régulation sont importants lorsque les débits sont élevés.

Presqu'une décénie après l'élaboration du modèle, Grace et Potts (1964) développent davantage la méthode d'un point de vue théorique. Leur principale découverte est une équation de diffusion représentant la dispersion. La présence d'un paramètre de diffusion à l'intérieur du modèle permet d'élargir son champ d'application. Celui-ci caractérise le taux de dispersion du peloton. La méthode est expérimentée par Herman (1964) et de bons résultats sont trouvés pour des débits moyens.

Seddon (1972), Nemeth (1970) et Tracz (1975) ont expérimenté le modèle de Pacey et dans tous les cas, des résultats significatifs pour des conditions satisfaisant les hypothèses du modèle étaient obtenus.

Parmis la littérature consultée, aucune publication ne relate l'utilisation de cette méthode pour la coordination des feux en situation réelle.

i) Analyse des hypothèses de la théorie.

Selon Pacey, la dispersion des pelotons est expliquée par la différence de vitesse entre les véhicules. Tenant compte de cette supposition, si on connaît la distribution des vitesses f(v)dv, le profil des pelotons pourra être prédit «t» secondes après la tombée du vert. Deux hypothèses sont alors posées par Pacey;

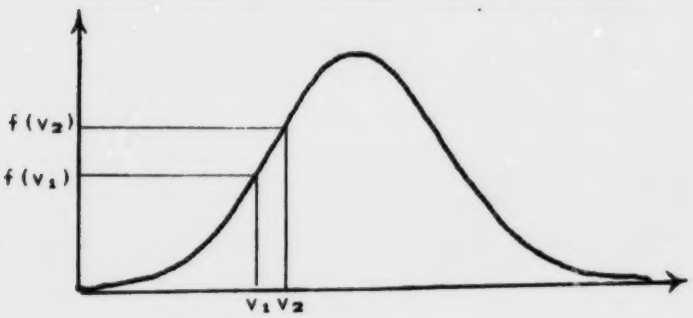
1- la distribution des vitesses, f(v)dv, suit une loi normale;

2- la vitesse propre à chaque véhicule est constante tout le long du trajet.

Selon la première hypothèse, f(v)dv possède donc les propriétés de la distribution normale. On peut alors connaître la proportion des véhicules f(v) d'un peloton qui voyage à une vitesse v. De plus, la probabilité de rencontrer cette proportion à l'intérieur de ce peloton est donnée par l'aire sous la courbe délimitée par v_1 et v_2 lorsque ceux-ci sont voisins (i.e. lorsque $v_2 = v_1 + dv$) (fig 1.6).

FIGURE 1.6

Distribution normale des vitesses



Ainsi l'aire approximative sous la courbe sera donnée par:

$$A_{appr} = (v_2 - v_1) f(v_1) + \frac{[(v_2 - v_1)(f(v_2) - f(v_1))]}{2}$$

$$= \frac{f(v_1)\nabla(v) + (\nabla f(v)\nabla v)}{2}$$

$$= f(v)dv + 0 \qquad \text{(si } v_2 \text{ est voisin de } v_1\text{)}$$

Puisque la distribution normale est une fonction de densité, la somme de toutes les aires $f(v)dv$ de $v_1 = -\infty$ à $v_2 = +\infty$ est égale à un.

Suite à cette hypothèse, la position des véhicules dans le peloton est indépendante de leur vitesse. Ainsi, la probabilité d'avoir un véhicule dans le peloton circulant à une vitesse «v» sera la même qu'il soit à l'avant, à l'arrière ou au centre du peloton.

La deuxième hypothèse implique qu'il n'y ait pas d'interférence entre les véhicules. Donc un véhicule lent ne gênera pas le mouvement des véhicules plus rapides. L'accélération et la décélération étant considérées comme nulles.

Si on veut vérifier le modèle en pratique, il faut que les conditions de circulation respectent ces hypothèses. Le débit doit donc être faible et le nombre de voies supérieur à «un» afin de minimiser les interférences entre les véhicules. De plus, le premier point d'observation doit être séparé du carrefour en amont par une distance permettant de s'assurer que l'accélération des véhicules est terminée.

Comme on peut le constater ces conditions de circulation ne sont pas toujours observées en réalité. Les hypothèses du modèle semblent restreindre le champ d'application de la théorie de Pacey.

L'élaboration du modèle de Pacey ainsi que son aspect hydrodynamique développé par Grace et Potts (1964), sont discutées dans un ouvrage de référence disponible à la section Génie des transports de l'école Polytechnique (Lefebvre 86). Pour faciliter la compréhension du modèle et comparer éventuellement des résultats de sa simulation avec d'autres modèles, un programme informatique a été écrit et est également présenté dans ce document.

1.4.2 Le modèle de Robertson

i) historique

L'importance qu'on doit apporter à la dispersion des pelotons dans la coordination des feux a été démontrée par Hillier et Rothery (1967). Les données de leur expérience effectuée sur quatre sites à Londres, ont par la suite permis à Robertson (1968) de développer une méthode pouvant prédire le profil d'arrivée d'un peloton à un point B, connaissant son profil de départ à un point A. La relation suivante a été dégagée à partir de l'observation de 700 pelotons répartis sur les quatre sites:

$$q_B(i+t)=Fq_A(i)+(1-F)q_B(i+t-1)$$

d'où

$q_A(i)$ = le débit de la ième intervalle du profil de départ au point A

$q_B(i+t)$ = le débit prédit à l'intervalle (i+t) au point B

F = facteur de lissage = $1/(1+0,5t)$

t = temps de parcours du véhicule de tête entre les postes A et B

La grande utilisation du programme TRANSYT en pratique, a suscité plus d'attention à l'endroit de cette méthode de

la part des chercheurs que les autres modèles de dispersion.

Dans la conclusion de son article portant sur sa méthode Robertson (1968) mentionne qu'il serait raisonnable de s'attendre à ce que le facteur F soit fonction aussi des caractéristiques du site. Cette intuition a été confirmée par les travaux subséquents réalisés sur le modèle.

C'est ainsi qu'en ajustant le profil du débit simulé aux données de leur enquête, Seddon (1972) et Collins (1974) constatent qu'une variation de la valeur 0,5 dans la relation F du modèle, permet d'atteindre une représentation optimale du profil du débit observé.

Il semblait dès lors que la constante fixée originellement à 0,5 par Robertson serait fonction des conditions du site et représenterait la dispersion. L'expression donnant le facteur F est alors modifiée en changeant la constante par un paramètre de dispersion nommé alpha (α) variant entre zéro et un:

$$F = 1/1+\alpha t$$

S'il n'y a pas de dispersion, la valeur de alpha est zéro et F est égal à un. Lorsque la dispersion est maximale, alpha est égal à un et F dépend uniquement du temps de parcours du véhicule de tête. Ces résultats sont toutefois insuffisants pour établir une relation entre les caractéristiques du site et la dispersion. La formule à l'intérieur de TRANSYT est alors inchangée, fixant à 0,5 la

valeur de alpha pour tout les types de sites.

D'autres études effectuées également en Europe par Tracz (1975) et El-Reedy (1978), montrent encore une fois la variabilité du paramètre alpha pour des sites différents et manifestent également le besoin d'une étude exhaustive pour déterminer le facteur alpha plus précisément.

Une des premières études nord-américaine portant sur la dispersion des pelotons a été réalisée par Lam (1977). Les conditions représentaient la circulation en périphérie d'un centre urbain. Suite aux remarques de Seddon (1972) sur la surestimation des débits, une méthode est alors proposée par Lam pour éliminer cette lacune.

Il faut toutefois attendre les travaux de Tarnoff (1981) pour établir une relation entre la dispersion et les caractéristiques du site. En comparant les résultats obtenus par Lam (1977), Robertson (1968) et ceux de son enquête, il observe que le facteur alpha augmente avec la dispersion. Il suggére alors d'utiliser des valeurs correspondant à trois différents niveaux de friction pour la détermination de alpha.

Lors de l'adaptation de la septième version de TRANSYT aux conditions d'Amérique du Nord, Wallace (1981) modifie l'utilisation du logiciel en remplaçant la constante 0,5 par le choix suggéré par Tarnoff (1981) (tableau 1.5).

Tableau 1.5

Choix suggéré dans TRANSYT pour la constante de dispersion alpha

ALPHA	FRICTION	CONDITIONS DE CIRCULATION
0,50	élevée	Stationnement, nombre de virages modéré à élevé, trafic piétonnier modéré à élevé, voie de circulation étroite. Conditions typiques d'un centre-ville
0,35	moyenne	Nombre de virages faible, trafic piétonnier faible, largeur des voies moyenne. Grande artère typique d'un centre-ville
0,25	faible	Pas de stationnement, voies divisées, voies de virage exclusif, voies de circulation larges. Trafic typique d'une grande artère suburbaine

La détermination de ces valeurs repose toutefois sur une évaluation qualitative du site; les travaux effectués dès lors ne permettant pas d'établir une relation mathématique entre la friction du site et la dispersion. Suite à ces changements et à l'utilisation accrue de TRANSYT, les études sur la dispersion des pelotons se poursuivent en ayant toujours comme but la calibration du modèle de Robertson.

Une étude effectuée par McCOY (1983) avait pour objectif d'apporter une contribution supplémentaire pour les conditions où la friction du site est faible. Il constate que les valeurs de son enquête ne correspondent pas à celles

suggérées dans TRANSYT. Il obtient un alpha optimal de 0,18 au lieu de 0,25 tel que recommandé dans TRANSYT.

CASTLE (1985) obtient sur des liens très longs avec peu de friction des valeurs pour le facteur de dipersion alpha variant entre 0,3 et 0,5, entrant également en contradiction avec les valeurs suggérées dans TRANSYT.

Axhausen et Körling (1986) démontrent que le choix qualitatif proposé dans TRANSYT peut conduire à des erreurs importantes lorsqu'on simule ou qu'on optimise la circulation sur un réseau.

L'analyse des études portant sur la calibration du facteur alpha semble ainsi démontrer le besoin d'une relation mathématique dans la détermination du facteur de dispersion alpha. L'analyse du modèle et de ses composantes permettra de comprendre sa dynamique en vue de certaines applications ultérieures.

ii) Développement théorique du modèle

D'après son article, tout laisse croire que Robertson n'a pas développé son modèle suivant une approche théorique. Devant le succès de la méthode, Seddon (1972) soupçonne toutefois la possibilité d'un développement s'appuyant sur un concept théorique. En effectuant différentes manipulations sur la formule de récurrence, il obtient toutefois une expression représentant la distribution géométrique:

$$q_B(i+t) = Fq_A(i) + (1-F)q_B(i+t-1)$$

or

$$q_B(i+t-1) = Fq_A(i-1)+(1-F)q_B(i+t-2)$$

donc

$$q_B(i+t) = Fq_A(i)+(1-F)[Fq_A(i-1)+(1-F)q_B(i+t-2)]$$
$$= Fq_A(i)+F(1-F)q_A(i-1)+(1-F)^2 q_B(i+t-2)$$

or

$$q_B(i+t-2) = Fq_A(i-2)+(1-F)q_B(i+t-3)$$

donc

$$q_B(i+t) = Fq_A(i)+F(1-F)q_A(i-1)+(1-F)^2[Fq_A(i-2) + (1-F)q_B(i+t-3)]$$

$$= Fq_A(i)+F(1-F)q_A(i-1)+ F(1-F)^2 q_A(i-2) + (1-F)^3 q_B(i+t-3)$$

le dernier terme peut être ainsi développé jusqu'à ce que la valeur $q_A(1)$ soit atteinte, $q_A(0)$ étant zéro.

$$= F(1-F)^0 q_A(i)+F(1-F)^1 q_A(i-1)+F(1-F)^2 q_A(i-2) + F(1-F)^3 q_A(i+t-3)....+F(1-F)^{i-1} q_A(1)$$

en posant $j=i+t$

$$q_B(j)=\Sigma q_A(i)F(1-F)^{j-t-i}$$

En s'inspirant des travaux de Baass (1985) et du concept probabiliste des épreuves de Bernoulli (Baillargeon 1978), on peut développer théoriquement le modèle de Robertson.

Le profil A de la figure 1.7 (A) représente le débit par intervalle à la ligne d'arrêt (le poste A). Après un temps t, la différence de vitesse et les interactions des véhicules avec le site vont causer la dispersion telle

qu'indiquée par le profil B de la figure 1.7 (B).

FIGURE 1.7 (A)

Profil du débit au poste A

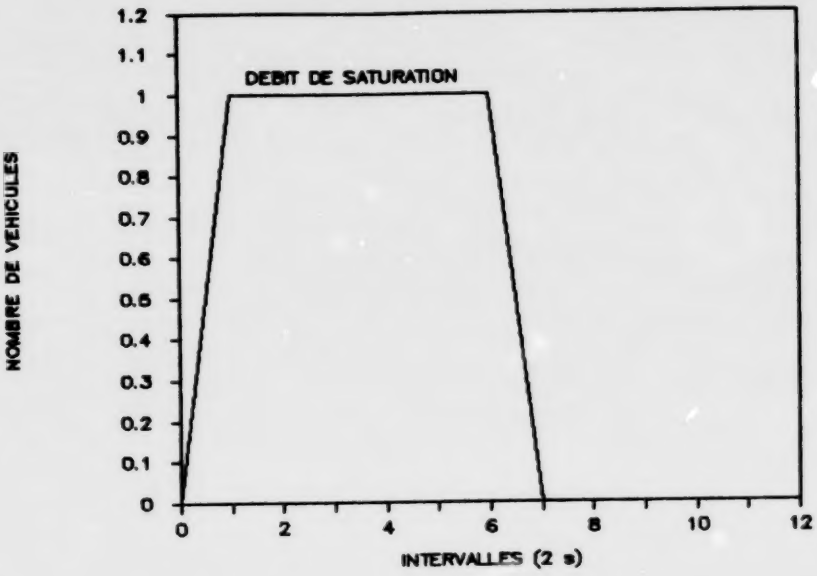
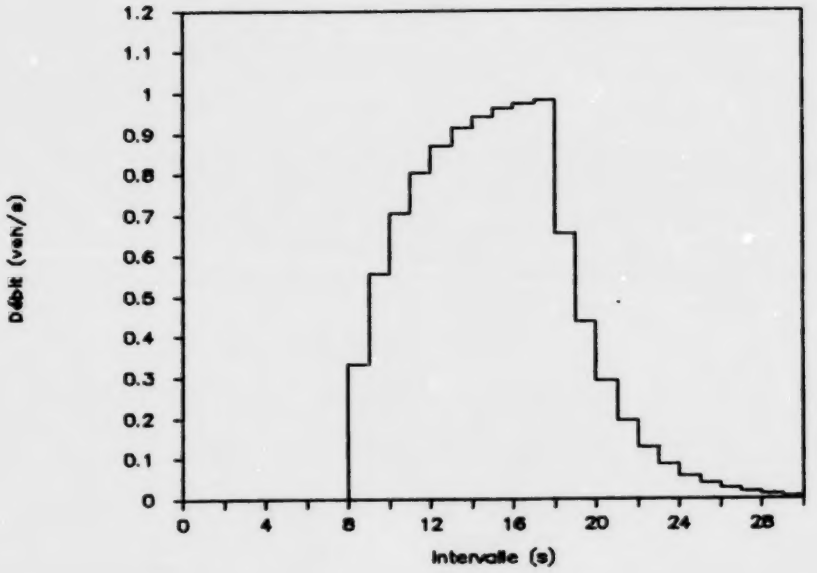


FIGURE 1.7 (B)

Profil du débit au poste B



Si on prend le débit du premier intervalle passant la ligne d'arrêt, le problème consiste à évaluer la probabilité de retrouver ce débit dans chacun des intervalles du profil à prédire. On connaîtra alors la portion de ce débit composant chacun des intervalles de ce profil. En procédant de la même façon pour les autres intervalles à la ligne d'arrêt, on obtient le profil prédit en sommant toutes les portions par intervalle. Ce problème peut se solutionner en se basant sur le lemme suivant:

La prédiction des intervalles des débits formant le peloton correspond à un phénomène de Bernoulli puisqu'elle satisfait les trois conditions suivantes:

1- chaque épreuve a seulement deux résultats possibles; soit la réalisation d'un certain événement (succès) ou la non-réalisation de l'événement (insuccès);

2- la probabilité de réalisation de l'événement est la même à chaque épreuve et est identifiée par F;

3- les épreuves sont indépendantes.

Donc, en se basant sur ces conditions, la probabilité que le débit de l'intervalle i se retrouve à l'intervalle i+t (succès) est F et la probabilité qu'il n'y soit pas est 1-F (echec). La probabilité de retrouver une fraction d'un débit originant de l'intervalle 1 dans l'intervalle t+1 est la même pour chaque intervalle i+t (t est le temps de parcours du véhicule de tête).

Ainsi, la probabilité que le débit de l'intervalle 1 se retrouve à l'intervalle t+1 en un temps de parcours t est:

$$q_B(t+1)=F[q_A(1)]$$

où

$q_A(1)$ est le débit du premier intervalle au poste A

Puisque le temps de parcours le plus petit est «t» (le temps de parcours du véhicule de tête), la probabilité d'effectuer le déplacement dans un temps inférieur (t-1) est nulle. La partie résiduelle du débit non affecté, c'est-à-dire la probabilité que le débit de l'intervalle 1 ne se retrouve pas à l'intervalle t+1 (échec) est donnée par:

$$\begin{aligned}[\text{Partie résiduelle de } q_A(1)] &= q_A(1)-F[q_A(1)] \\ &= (1-F)q_A(1)\end{aligned}$$

Ce qui correspond à la première condition des épreuves de Bernoulli. Cette partie résiduelle va être distribuée à son tour sur l'intervalle suivant selon la même probabilité F, respectant la deuxième condition.

$$\begin{aligned}q_B(t+2) &= F[(1-F)q_A(1)] \\ [\text{Partie résiduelle}] &= (1-F)F[(1-F)q_A(1)] \\ &= (1-F)^2Fq_A(1)\end{aligned}$$

La nouvelle partie résiduelle résultante sera à son tour affectée de la même façon sur l'intervalle suivant.

$$q_B(t+3) = F[(1-F)^2 F q_A(1)]$$

Le processus se poursuit jusqu'à ce que la partie résiduelle approche zéro. Ces étapes de la distribution du débit du premier intervalle au poste A sont répétées pour les débits des intervalles suivants ($q_A(2)$, $q_A(3)$, ..., $q_A(n)$). La somme dans chaque intervalle du poste B des débits distribués donne le profil des débits prédits. Cette somme représente la distribution géométrique:

$$q_B(i+t)=F(1-F)^0 q_A(i)+F(1-F)^1 q_A(i-1)$$
$$+F(1-F)^2 q_A(i-2)+\ldots+F(1-F)^{i-1} q_A(1)$$

Avec Pacey, la probabilité n'est pas fixe puiqu'elle correspond à la distribution normale, le débit par intervalle l'est. Ici, la probabilité est fixe, c'est le débit résiduel par intervalle d'origine qui varie à chaque affectation.

Les étapes de chacune de ces répartitions sont présentées au tableau 1.6.

TABLEAU 1.6

Dynamique du modèle de Robertson

Débit prédit par intervalle au poste B

Débit par interv. au poste A	t+1	t+2	t+3	t+4	....	t+n	TOTAL
							P
1	$Fq_A(1)$	$F(1-F)q_A(1)$	$F(1-F)^2q_A(1)$	$F(1-F)^3q_A(1)$	....	$F(1-F)^{n-1}q_A(1)$	R
2	0	$Fq_A(2)$	$F(1-F)q_A(2)$	$F(1-F)^2q_A(2)$	....	$F(1-F)^{n-2}q_A(2)$	O
3	0	0	$Fq_A(3)$	$F(1-F)^1q_A(3)$	....	$F(1-F)^{n-3}q_A(3)$	F
4	0	0	0	$Fq_A(4)$	....	$F(1-F)^{n-4}q_A(4)$	I
:	0	0	0	0	....	:	L
:	0	0	0	0	....	:	
:	0	0	0	0	....	:	E
n	0	0	0	0	....	$F(1-F)^{n-n}q_A(n)$	N
TOTAL	Profil du débit prédit en B						A

iii) Détermination du facteur F

Une fois son modèle établi, Robertson doit trouver la relation donnant la probabilité F. A partir de son modèle, il exprime F en fonction des débits prédits et observés:

$$F = q_A(i+t) - q_A(i+t-1) / q_B(i) - q_A(i+t-1)$$

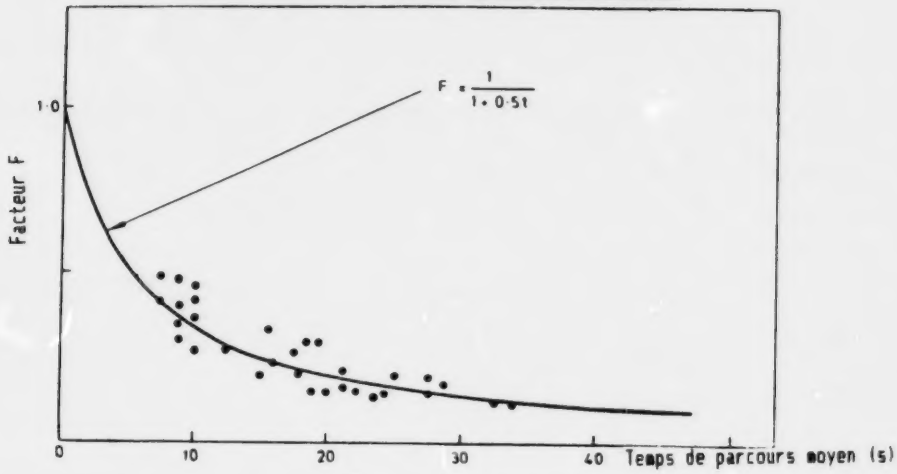
En utilisant les données de Hillier, Robertson obtient différentes valeurs de F pour différentes valeurs du temps de parcours qu'il transpose sur un graphique (figure 1.8). Il dégage alors la relation représentant le mieux la courbe obtenue:

$$F = 1/1+0,5t$$

où t est le temps de parcours du véhicule de tête

FIGURE 1.8

Résultats de l'étude de Robertson



Dans la formule de Robertson le facteur F est donc déterminé uniquement par le temps de parcours moyen du peloton entre les points A et B, alpha étant une constante fixée à 0,5 selon les données de l'expérience. Robertson (1968) mentionne toutefois que le facteur F doit être également fonction des caractéristiques du site.

iv) Analyse des paramètres alpha et béta.

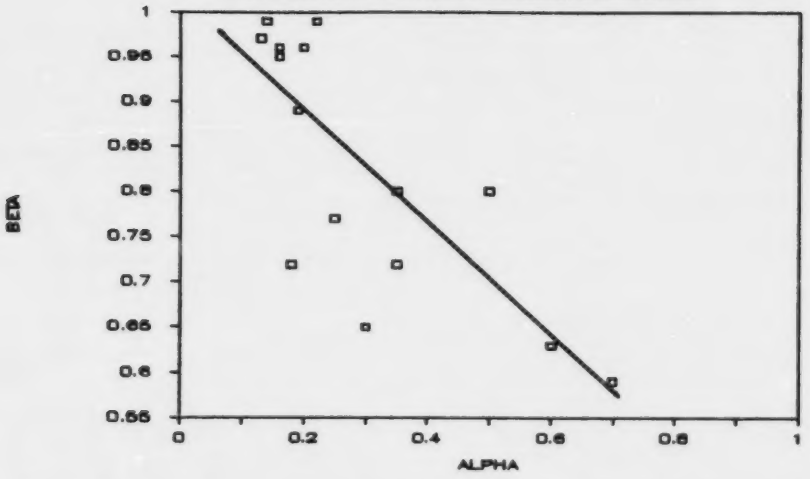
Les études sur le modèle de Robertson se sont davantage concentrées sur la calibration du paramètre de dispersion alpha. Le paramètre béta qui dépend également des conditions du site, est toujours considéré dans le programme TRANSYT comme une constante fixée à 0,8 depuis l'élaboration du modèle.

Puisqu'il représente le rapport du temps de parcours du

premier véhicule sur celui du peloton, les études ont confirmé qu'il n'est pas constant et varie de façon inverse aux conditions du site. Une équation de régression peut être ainsi déterminée entre ces deux paramètres en se basant sur l'ensemble des résultats obtenus des expériences précédentes (figure 1.9).

FIGURE 1.9

Relation entre alpha et béta



Le fait de considérer béta constant présente deux avantages. Premièrement, l'utilisation d'une technique simple de recherche de l'optimum minimise les erreurs de calibration. Deuxièmement, il est plus facile de comparer la dispersion entre différents sites.

Le modèle de Robertson est celui qui a attiré le plus l'attention des chercheurs. La qualité des résultats obtenus et sa vaste utilisation dans TRANSYT semblent expliquer cet intérêt. Le tableau 1.7 présente les études effectuées sur la calibration.

TABLEAU 1.7

Etudes effectuées sur la calibration du modèle de Robertson

REFERENCES	DESCRIPTION DES SITES	POSITION DES POSTES (m)	TECHNIQUES D'ENQUETE UTILISEES	ALPHA OPTIMUM
Robertson (1967)	- 4 sites présentant différentes caractéristiques géométriques	0,90,180,305	ruban perforé	0,50
Seddon (1972)	- trois voies, faible friction	61,122,183,244,305	vidéo	0,40
	- deux voies, forte friction	61,122,183,244,305	vidéo	0,63
Collins (1974)	- 3 sites de 3 voies avec faible friction	330,550	manuelle et radio	0,20
Tracz (1975)	- deux voies, 19% véh. lourds	60,200,300,400	film 16 mm	0,38
	- deux voies, 28% véh. lourds	100,200	film 16 mm	0,28
Lam (1977)	- deux voies, artère suburbaine	150,305,495,610	boucle de détection	0,24
El Reedy (1978)	- deux voies, artère suburbaine	330,420 560	photo par intervalle	0,25
Tarnoff (1978)	- faible friction	31,122,244	métronome	0,24
	- moyenne friction	31,122,244	métronome	0,37
Mc Coy (1981)	- faible friction, 2 voies	91,183,244	ruban	0,25
	- faible friction, 4 voies	91,183,244	ruban	0,18
Lorick (1981)	- 2 voies non disponible	non disponible	non disponible	0,36
Saelt (1984)	- 3 voies, faible friction	200,400,600, 800,1200,1600	boucle de détection	0,21
Denney (1985)	- 3 voies, faible friction	non disponible	non disponible	0,25
Castle (1985)	- 3 voies, faible friction	430, 453 .	métronome	0,50
Ohardi (1986)	- 3 sites, faible friction	non disponible	non disponible	0,27

CHAPITRE 2

PROBLEMATIQUE

L'importance de tenir compte de la dispersion des pelotons dans la coordination des feux a été démontrée par Hillier et Rothery (1967). Depuis, plusieurs programmes ont été élaborés en considérant le phénomène (tableau 1.1). C'est le cas du programme TRANSYT qui utilise le modèle de dispersion des pelotons de Robertson.

Les résultats du programme sont basés sur l'habilité du modèle de dispersion à prédire les profils des arrivées. Cette habilité dépend de la détermination appropriée du paramètre de dispersion alpha en fonction des caractéristiques du site. A l'origine, le paramètre alpha était considéré comme une constante fixée à 0,5. La démonstration de la variabilité du paramètre et l'utilisation croissante du programme TRANSYT incita alors sa calibration.

Bien que disparates et variant aux niveaux de leurs méthodologiesde cueillette, de calibration et d'analyse, les études sur le modèle de Robertson ont permis de dégager une relation qualitative reliant le paramètre alpha à la friction du site (Tarnoff 1981). Wallace (1981) portait ainsi l'habilité du modèle de dispersion à un choix de trois valeurs de dispersion incorporées dans la cinquième version de TRANSYT (tableau 1.5).

Toutefois, les résultats de la calibration de certaines études présentent des valeurs différentes de celles proposées dans TRANSYT pour des sites similaires (tableau 2.1).

TABLEAU 2.1

Valeurs de dispersion suggérées et valeurs obtenues pour des sites similaires

REFERENCES	FRICTION DU SITE	VALEURS SUGGEREES (TRANSYT)	VALEURS OBTENUES	DELTA (%)
Seddon (1972)	moyenne	0,35	0,40	+14
	forte	0,50	0,63	+26
Collins (1974)	faible	0,25	0,20	-20
McCOY (1981)	faible	0,25	0,18	-28
Castle(1985)	faible	0,25	0,50	+100
	faible	0,25	0,30	+20

Il semble que des facteurs autres que le type de rues ou d'artères expliqueraient ces différences. Malheureusement, l'information disponible sur ces enquêtes ne permet pas de tirer des conclusions concernant ces résultats.

Dans la majorité de ces travaux on conclut sur la nécessité d'entreprendre une étude exhaustive qui conduirait à une relation mathématique entre la dispersion et les caractéristiques du site. Les ressources qu'exigerait une telle étude ne sont toutefois pas justifiées par l'erreur attribuée au choix qualitatif du paramètre alpha. Cependant, Axhausen (1986) a démontré que cette erreur peut être considérable dans certaines situations.

Devant l'importance que revêt la dispersion des pelotons dans la coordination des feux, plus particulièrement de la grande utilisation du modèle de Robertson par l'intérmédiaire de TRANSYT dont dépend la qualité des résultats, il est essentiel d'enrayer l'ambiguïté occasionnée par un choix du facteur alpha basé sur des observations qualitatives.

Pour nous aider à préciser l'objectif de l'étude et à tracer la démarche à suivre pour l'atteindre, des hypothèses sont formulées afin d'expliquer la divergence des résultats de certaines études portant sur la calibration du paramètre alpha.

CHAPITRE 3

OBJECTIF ET METHODOLOGIE

3.1 FORMULATION DES HYPOTHESES

Les expériences portant sur la calibration du modèle de Robertson, ont démontré que le paramètre de dispersion alpha dépend des conditions géométriques et environnementales du site (nombre de voies, pente, stationnement, etc..). Pour le modéliser il doit donc être évalué par rapport à chacun des facteurs représentant ces caractéristiques physiques. Cependant, la calibration effectuée jusqu'à maintenant ne couvre qu'une partie du nombre considérable d'études nécessaires à l'établissement d'une relation mathématique.

Or, la divergence dans les résultats de calibration de certaines études (tableau 2.1) nous indique que les erreurs observées dans les extrants du programme TRANSYT ne seraient pas attribuées uniquement au choix qualitatif du facteur de dispersion et qu'une relation mathématique découlant d'études ne considérant que le type de rues ou d'artères ne solutionnerait pas nécessairement le problème.

En examinant le choix proposé dans TRANSYT (tableau 1.5), on constate que les caractéristiques de l'écoulement ne sont pas considérées. L'importance des débits dans l'expérience de Castle (1985) par exemple pourrait expliquer pourquoi, on obtient un facteur de 0,5 pour une artère

suburbaine alors que la valeur proposée dans TRANSYT est 0,25.

Par conséquent, l'objectif de l'étude est de déterminer la relation entre le débit et la dispersion. Les résultats obtenus devraient permettre d'expliquer l'imbroglio actuel en améliorant la précision du modèle de Robertson.

Pour formuler les hypothèses de base à vérifier dans cette approche, deux catégories de dispersion sont identifiées; la dispersion interne qui est occasionnée par l'interaction des véhicules dans le peloton et la dispersion externe correspondant aux caractéristiques géométriques et environnementales du site.

3.1.1 Friction interne

Les facteurs étudiés jusqu'à maintenant concernent le site et sont externes aux caractéristiques du peloton (i.e. débit, composition du trafic, etc..). Or, la dispersion n'est pas causée uniquement par les caractéristiques environnementales décrivant le site.

Ainsi, dans le cas où les conditions de circulation sont idéales, que la composition du trafic est homogène et que les débits sont tels qu'il n'existe aucune interférence entre les véhicules, la dispersion va être causée uniquement par les différences de vitesses entre les véhicules. La distribution des temps de parcours suit alors une loi

normale et le modèle de Pacey s'applique avec succès.

Cette constatation permet d'élaborer un second concept reliant la dispersion à la friction interne. Les principaux points à vérifier caractérisant cette nouvelle dimension de la dispersion sont décrits ci-dessous.

Si on augmente le nombre de véhicules dans un peloton où il n'existe aucune interférence, on augmente aussi la probabilité d'avoir un véhicule lent en avant d'un véhicule plus rapide. Ce dernier doit alors changer de voie afin de dépasser celui qui le gêne. Pour ce faire, il doit attendre la présence d'un créneau lui permettant de s'insérer dans le flux plus rapide de la voie adjacente.

La présence de véhicules lents à l'intérieur du peloton affecte la vitesse des autres véhicules qui doivent procéder à une vitesse temporairement plus lente, augmentant par conséquent l'étendue du peloton.

Nous pouvons donc poser l'hypothèse que cette interaction accompagnée de la manoeuvre de dépassement augmente la dispersion. Actuellement, la dispersion des pelotons est considérée constante sur le site où elle est observée.

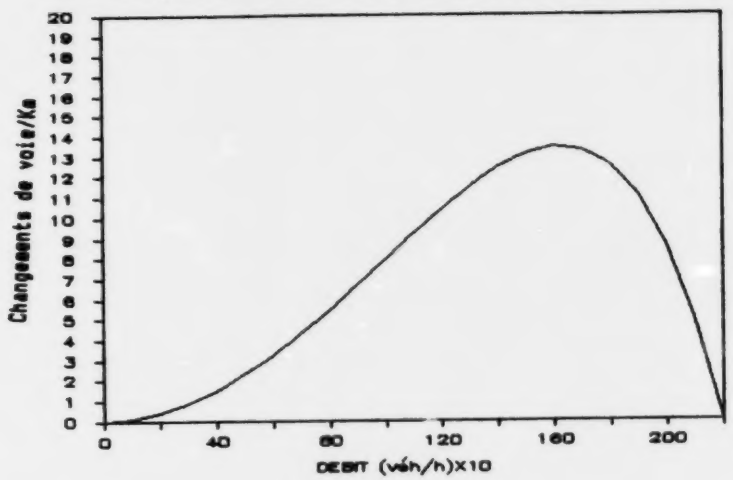
Si on augmente encore le nombre de véhicules, cette manoeuvre devient plus fréquente et le peloton se disperse encore plus. Toutefois, l'augmentation du débit de la seconde voie va faire diminuer la vitesse d'écoulement de celle-ci jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre les voies aux niveaux des débits et des vitesses. A ce moment,

la dispersion se stabilise et le changement de voie diminue puisqu'il n'y a aucun intérêt à faire cette manoeuvre pour l'usager.

Wardrop (1952) a développé un modèle théorique reliant le changement de voie au débit qui semble appuyer le concept de friction interne décrit jusqu'à maintenant. En simulant différents débits avec son modèle, nous obtenons le graphique présenté à la figure 3.1.

FIGURE 3.1

Changements de voie en fonction du débit



Donc, une seconde hypothèse à vérifier est la diminution de la dispersion lorsqu'un équilibre dynamique s'installe entre les voies.

On peut anticiper aussi que la friction interne sera influencée par la position des véhicules lents et le pourcentage de véhicules lourds à l'intérieur du peloton. Ainsi, un véhicule lent situé au début du peloton va occasionner

plus de frictions internes, et par conséquent, une plus grande dispersion. Donc deux sites identiques à tout point vue mais dont la présence cyclique de véhicules lents comme les autobus à l'avant du peloton, donnera un facteur alpha plus grand qu'un site où ils sont situés à l'arrière.

3.1.2 Friction externe

Tous les facteurs environnementaux venant affecter directement ou indirectement le flux sont considérés comme facteurs externes. Leurs effets peuvent être uniformes (géométrie de la rue), cycliques (feux de circulation), aléatoires (mouvements piétonniers, incidents) ou une combinaison des trois.

Les facteurs externes vont donc venir accentuer les effets sur la dispersion des facteurs internes. L'atteinte du niveau de stabilité entre les voies va se faire plus rapidement.

Une troisième hypothèse voudrait que l'intensité des effets externes sur la dispersion soit plus forte pour un gros peloton que pour un plus petit; compte tenu de la capacité offerte par le site.

Suite à ces hypothèses, on peut alors dégager les trois stades suivants caractérisant la friction interne liée à l'augmentation du débit:

- débits faibles

Aucune friction, rapport débit sur capacité très faible de telle sorte qu'il n'existe pas d'interaction entre les véhicules. Dans ce cas, la dispersion est occasionnée uniquement par les différences de vitesses et la valeur du facteur de dispersion alpha est faible et instable.

- débits moyens

L'augmentation des débits occasionne plus d'interactions entre les véhicules et un plus grand nombre de changements de voies. La dispersion du peloton s'accroît. En augmentant encore les débits, une stabilité entre les voies s'installe graduellement. Un équilibre se crée impliquant une diminution du nombre de changements de voies. La valeur du facteur de dispersion alpha se stabilise.

- débits élevés

Si les débits deviennent élevés par rapport à la capacité disponible, le peleton ne peut plus se disperser. La valeur du facteur de dispersion alpha diminue et tend vers zéro; ce qui est contraire au concept de dispersion actuel.

Selon les caractéristiques du site ou la friction externe, l'amplitude de la variation de la dispersion s'effectuera plus ou moins rapidement. Si la friction externe est très forte, il y aura contraction du peloton.

Le concept hypothétique reliant les facteurs internes aux facteurs externes peut se comprendre à l'aide du tableau 3.1.

Visuellement, la relation entre la friction externe, la friction interne et la dispersion peut se représenter par les courbes de la figure 3.2. En passant d'un site à un autre, l'amplitude de la courbe change selon la friction externe propre au site.

3.2 SOUS-OBJECTIFS

Les sous-objectifs consistent à vérifier les trois hypothèses formulées précédemment sur le concept de friction.

1) la dispersion augmente avec l'accroissement du débit représentant la friction interne;
2) lorsque les débits ont atteint un certain niveau de friction interne, la dispersion diminue;
3) la variation d'un facteur externe sera plus significative sur des débits importants que pour des débits faibles.

3.3 METHODOLOGIE

La réalisation de l'objectif de la présente étude s'effectue en s'inspirant du cheminement classique de l'approche scientifique (Dickey 1984). L'organigramme de la figure 3.3 présente les principales étapes à suivre pour vérifier les hypothèses posées précédemment.

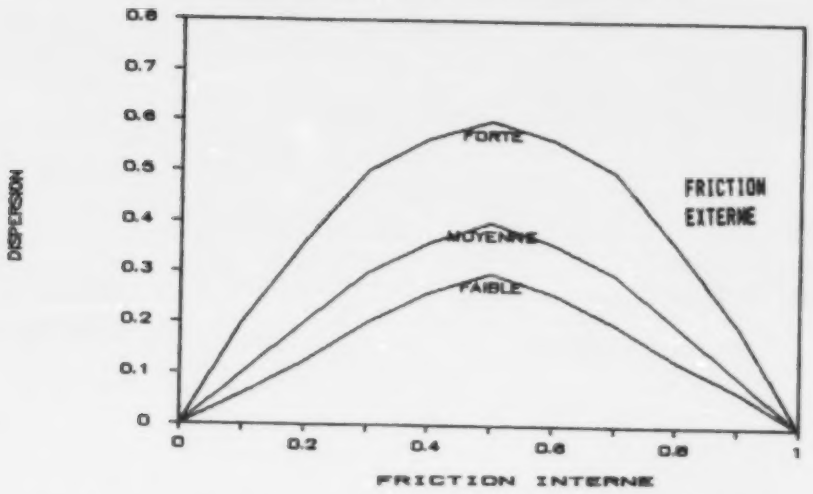
TABLEAU 3.1

Concept de friction à deux dimensions

FRICTION INTERNE \ FRICTION EXTERNE	FAIBLE	MOYENNE	FORTE
FAIBLE	- aucune interaction - dispersion très faible - alpha instable (0 à 0,15)	- interactions partielles - dispersion faible - alpha instable (0,15 à 0,20)	- interactions fréquentes - dispersion moyenne - alpha instable (0,20 à 0,30)
MOYENNE	- interactions - dispersion faible - alpha stabilise (0,15 à 0,30)	- interactions - dispersion moyenne - alpha stabilise (0,20 à 0,40)	- interactions - dispersion forte - alpha stable (0,30 à 0,60)
FORTE	- stabilité - dispersion diminue - alpha stable (0,30 à 0,25)	- contractions - dispersion diminue - alpha stable (0,40 à 0,15)	- contractions - dispersion diminue - alpha stable (0,60 à 0)
CONCEPT ACTUEL	0,25	0,35	0,50

FIGURE 3.2

Relation entre les frictions externes et internes et la dispersion

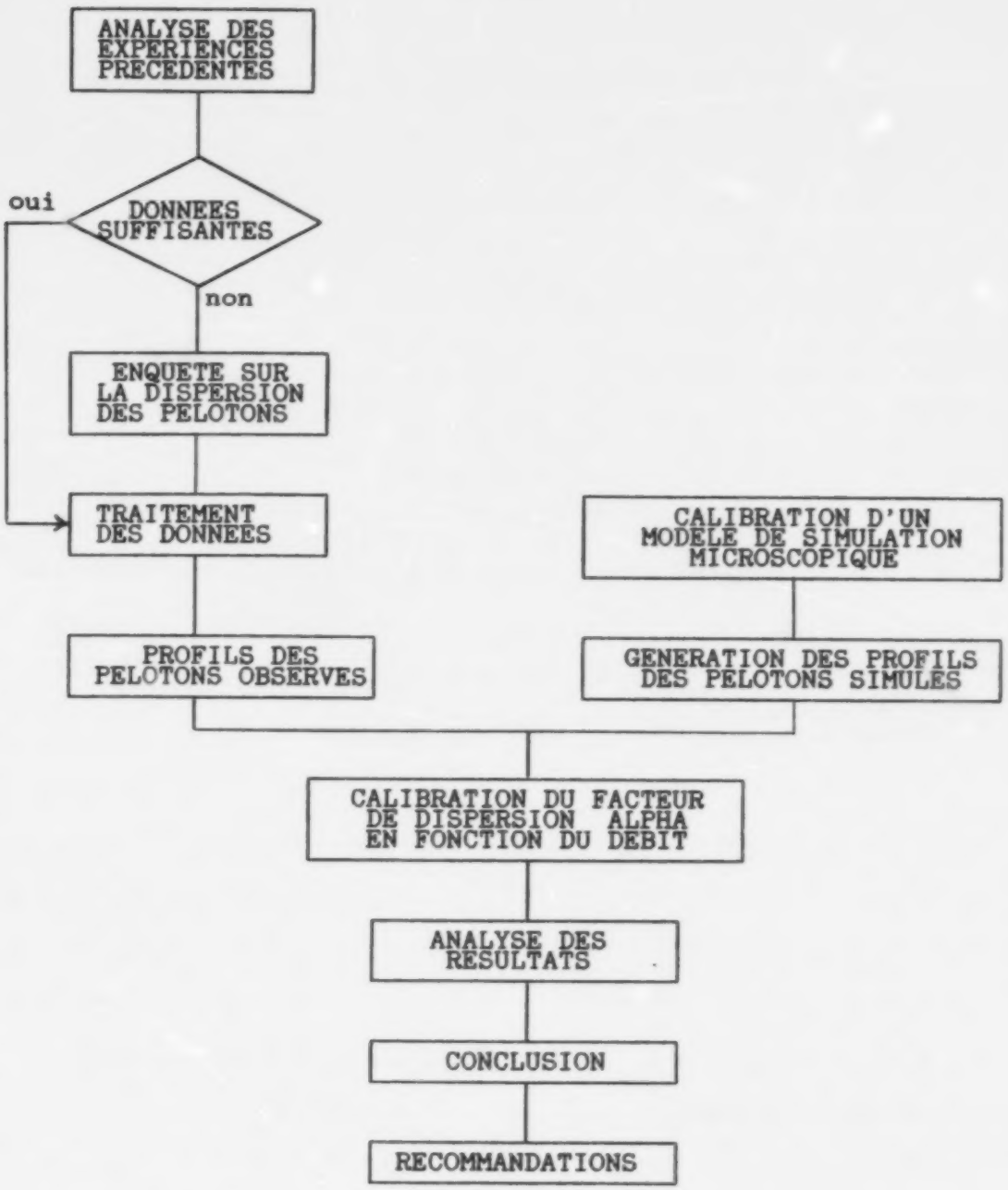


Puisque certaines données des expériences précédentes sont disponibles, une analyse de celles-ci permettra de vérifier certaines hypothèses et d'analyser les différentes techniques et appareillages utilisés lors de ces enquêtes.

Si l'information relative à ces expériences est insuffisante, une enquête sera nécessaire afin d'obtenir des profils de pelotons de grosseurs différentes. Une fois ces profils de pelotons disponibles, les résultats de la calibration du facteur alpha seront comparés avec ceux des pelotons théoriques générés par un modèle microscopique (Manar 1987). Puisque les résultats produits par ce modèle sont en accord avec la loi d'interaction (car following), la comparaison des données observées confirmera la validité de la nouvelle théorie.

FIGURE 3.3

Méthodologie de l'étude



CHAPITRE 4

ENQUETE SUR LA DISPERSION DES PELOTONS

4.1 ANALYSE DES DONNEES DES EXPERIENCES ANTERIEURES

Les différents articles publiés sur la dispersion des pelotons comportent en général une partie sur l'expérimentation. Dans la majorité des cas, les profils moyens des pelotons observés lors des expériences accompagnent l'article. Puisqu' avec ces profils on connaît la grosseur moyenne des pelotons, on peut évaluer si cette information peut servir à la vérification de nos hypothèses.

Pour ce faire, il faut des pelotons de différentes grosseurs ainsi que la durée de l'intervalle vert pour calculer le peloton maximum dans chacune des expériences. Or, aucune publication ne mentionne la durée de cet intervalle. De plus, certains profils présentés dans ces articles sont schématiques et les valeurs en ordonnée sont des multiples des fréquences réelles. Ainsi, le manque d'informations concernant les sites enquêtés empêche d'établir une relation entre le débit et la dispersion de façon à vérifier nos hypothèses.

Toutefois, il a été possible d'effectuer une autre analyse à partir de ces données afin de calibrer le modèle de Robertson. En s'inspirant de l'approche utilisée par Radelat et Euler (1980) pour la représentation du débit et

de la capacité sur un lien, la méthode consiste à introduire dans le profil de dispersion des pelotons le profil du débit de saturation (figure 4.1).

En utilisant les données des expériences précédentes, on calcule l'aire comprise entre le débit de saturation et le profil du peloton dispersé aux différents postes d'observation sur un lien. Une analyse de la variation de cette aire entre les postes est effectuée pour chaque enquête (figure 4.2).

Des résultats significatifs ont été trouvés et sont présentés dans un rapport (Lefebvre 1987) disponible à la section Génie des transports de l'école Polytechnique.

FIGURE 4.1

Dispersion des pelotons en fonction du débit de saturation

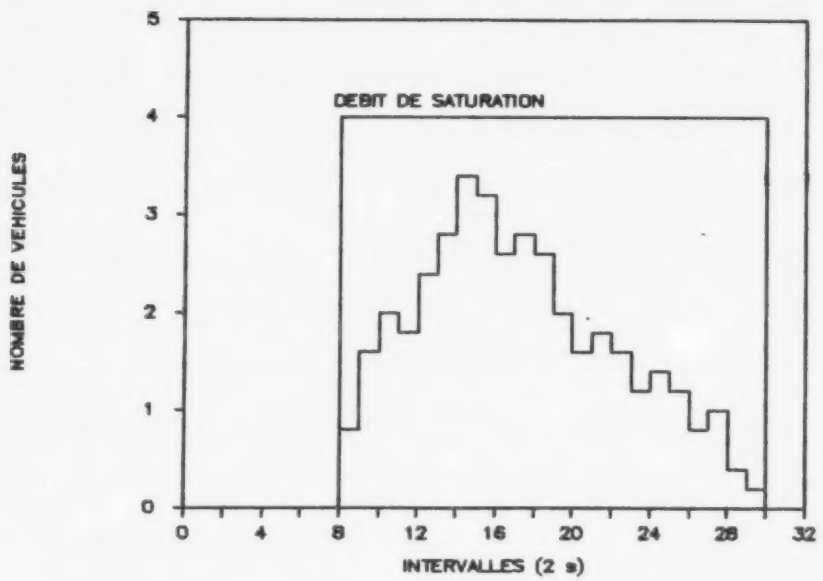
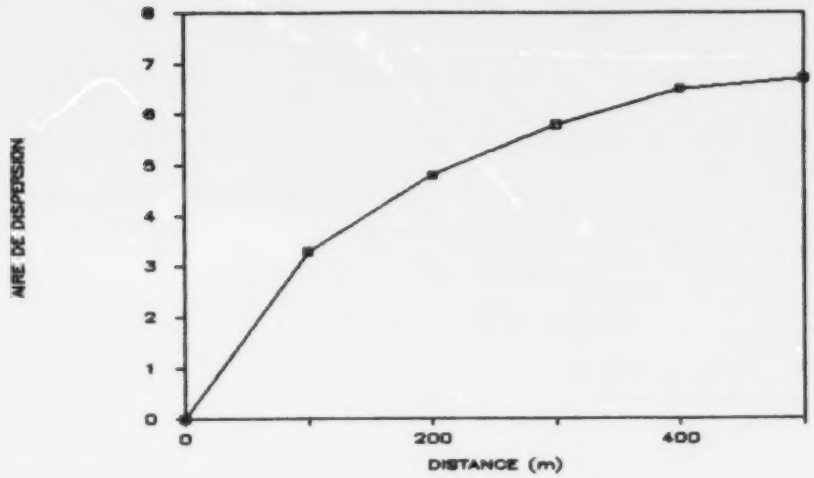


FIGURE 4.2

Variation de l'aire de dispersion
en fonction de la distance



4.2 CONCEPTION DE L'EXPERIENCE

4.2.1 Techniques d'enquêtes généralement utilisées

Le but de l'enquête est d'obtenir les données permettant de calibrer le facteur de dispersion du modèle de Robertson par rapport à différentes grosseurs de pelotons. Règle générale, la procédure utilisée pour mesurer la dispersion consiste à obtenir le temps de passage de chaque véhicule d'un même peloton, à deux postes d'observation ou plus en aval d'un carrefour signalisé.

Si on consulte la littérature, différentes techniques de cueillette sont utilisées dans le cadre des enquêtes portant sur la calibration du modèle de Robertson (tableau

1.7). Le choix d'une méthode d'enquête est basé sur certaines caractéristiques telles que la taille de l'échantillon, la nature des données à recueillir et les ressources disponibles.

Un examen de ces caractéristiques a permis de déterminer la méthode qui a été utilisée pour obtenir l'information nécessaire à la vérification de nos hypothèses.

4.2.2 Données à recueillir

Pour calibrer le facteur de dispersion du modèle de Robertson, les données suivantes doivent être recueillies à chacun des postes d'observation:

- heure de passage des véhicules à chaque poste d'observation;
- classe de véhicules (auto, bus, camion);
- heures du début et de fin de la phase verte (carrefour en amont);
- données bidons (incidents, anomalies, bizarreries).

Pour interpréter plus facilement les résultats de l'analyse et les comparer avec les résultats des enquêtes précédentes, les informations relatives au site sont également relevées au moment de l'enquête. Ces caractéristiques externes sont:

- longueur du lien;
- nombre de voies;
- largeur des voies;
- période de stationnement;
- pente;
- durée des phases;
- type des contrôleurs;
- présence de piétons;
- virages à droite et à gauche du carrefour en amont.

4.2.3 Taille de l'échantillon

Afin d'obtenir des résultats représentatifs de la réalité, il est nécessaire de connaître la quantité de données à recueillir. La méthode est développée en annexe en s'inspirant de l'approche utilisée par Dandy (1984). La relation suivante est alors obtenue:

$$n = (1{,}96\sigma/e)^2$$

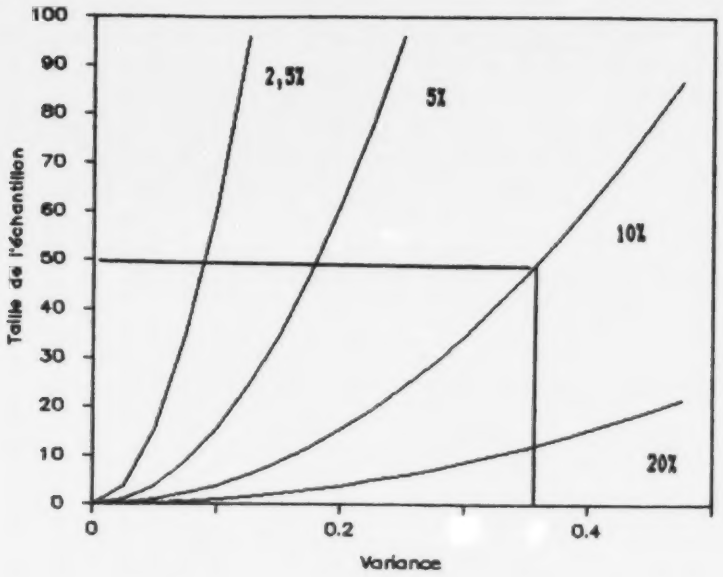
d'où

n = taille de l'échantillon
σ = écart-type de la population
e = erreur sur la moyenne pour un degré de confiance de 95%

Elle permet d'estimer le nombre de pelotons à recueillir par rapport à l'écart-type et à l'erreur tolérée sur la moyenne pour un intervalle de confiance de 95%. L'informatisation de la procédure a permis d'obtenir le graphique présenté à la figure 4.3.

FIGURE 4.3

Détermination de la taille de l'échantillon



Selon le graphique (figure 4.3), un échantillon de 50 pelotons pour chaque groupe est obtenu en considérant une variance de 0,37 et une erreur sur la moyenne de 10%. Ce qui semble raisonnable compte tenu des ressources disponibles.

Une fois l'échantillon recueilli, la variance de la population (σ^2) pourra être estimée à partir de la variance de l'échantillon (s^2) en utilisant la distribution de Student. Dans ce cas, l'équation devient:

$$n=(t\alpha/2\, s/e)^2$$

où $t\alpha/2$ est la valeur de t pour une probabilité $\alpha/2$

Connaissant la variance de la population, l'erreur sur les résultats de l'enquête pourra être déterminée.

4.2.4 Choix et description de l'équipement

L'évaluation des techniques d'enquêtes (tableau 1.7) utilisées pour mesurer la dispersion des pelotons nous indique que la méthode du vidéo serait la plus appropriée pour notre enquête, compte tenu des ressources disponibles et de la qualité des données désirées. Toutefois cette méthode restreint le choix du site en plus de demander beaucoup de temps pour la préparation et l'installation de l'équipement. De plus, une fois l'enregistrement visuel terminé avec la caméra, la cueillette des données doit s'effectuer sur le moniteur.

L'évolution de la micro-informatique a permis le développement d'appareils performants, de plus en plus petits et portatifs. Leur maniabilité, leurs caractéristiques techniques et leur accessibilité ont permis de considérer davantage la possibilité d'utiliser ce genre d'appareils pour la saisie des données de notre enquête.

Wood (1986) et Robertson (1984) ont utilisé cette technologie avec succès dans le cadre de leur expérience portant sur la détermination du débit de saturation et sur l'acquisition du profil du débit moyen sur une artère. Dans ces exemples, l'ordinateur portatif était utilisé non

seulement pour la saisie des données, mais aussi pour l'analyse.

Récemment, une importante étude subventionnée par le Conseil de la Recherche en Science et en Génie d'Angleterre (Bonsall 1987) encourageait l'utilisation de cette technologie en évaluant les différentes applications possibles pour la saisie de données dans le domaine du transport.

Les différentes contraintes liées à l'utilisation de l'équipement conventionnel pour mesurer la dispersion peuvent ainsi être atténuées ou éliminées à l'aide de la technologie des ordinateurs portatifs. La demande toujours croissante pour cette technologie a fait apparaître différents modèles.

Le choix de l'ordinateur portatif pour notre enquête a fait l'objet d'un article (Baass et Lefebvre 1987) qui traite des différents avantages reliés à l'utilisation de cette technologie pour la saisie de données en circulation par rapport aux méthodes conventionnelles.

Les caractéristiques déterminant le choix de l'ordinateur utilisé pour notre enquête sont ses possibilités de communication et de programmation, sa maniabilité, ses capacités de stockage et son coût. Puisque l'analyse s'effectue sur un ordinateur plus puissant, la capacité de la mémoire RAM (random access memory) n'est pas un critère important. De tous les ordinateurs portatifs analysés, le TANDY 102 répond le mieux à ces critères (annexe C). Les

caractéristiques de l'appareil sont présentées au tableau 4.1.

TABLEAU 4.1

Fiche technique du TANDY 102

CARACTERISTIQUES	
capacité	32 k
poids	1,8 kg
dimension	12X45X45 cm
unité	100 k
coût	600$

4.2.5 Adaptation de l'ordinateur pour les besoins de l'enquête

A l'aide d'un programme écrit en langage BASIC, le clavier de l'appareil est redéfini en fonction des données à recueillir. La localisation des nouvelles touches doit aussi faciliter la tâche de l'observateur. Ainsi, chaque fois qu'un véhicule passe un point donné, en appuyant sur la touche appropriée, l'ordinateur met en mémoire le type de véhicule avec son temps de passage et le cycle en cours. Les moments correspondant au début et à la fin de l'intervalle vert sont également enregistrés.

La description du programme ainsi que le principe d'utilisation de l'appareil sont présentés à l'annexe C.

4.2.6 Caractéristiques du site

Puisqu'on veut mesurer l'impact de la grosseur du

peloton sur la dispersion, le site ne doit pas contenir des sources d'interférences pouvant affecter le facteur de dispersion alpha. La capacité le long du lien doit être homogène dans le temps de telle sorte qu'une variation de la dispersion ne peut être reliée qu'à la variation de la grosseur du peloton. Le site est choisi en fonction des caractéristiques présentées au tableau 4.2.

Une grande variation des débits au cours de la journée est importante afin de bien mesurer l'impact des changements sur la dispersion. L'emplacement des postes d'observation doit permettre une bonne visibilité sans que la circulation en soit affectée de quelques façons.

4.2.7 Localisation des postes d'observation

Le premier poste doit être localisé à une distance permettant de s'assurer que la phase d'accélération est terminée. La longueur de la phase d'accélération dépendra en général de la vitesse permise.

La littérature (tableau 1.7) nous indique qu'en moyenne le premier poste est situé à une distance de 100 m du carrefour. Les deux autres postes sont séparés d'une distance égale afin de faciliter la comparaison des statistiques entre les postes.

Taleau 4.2
Caractéristiques des sites recherchés

FRICTION EXTERNE		FRICTION INTERNE
Caractéristiques opérationnelles du carrefour en amont	Caractéristiques géométriques	Caractéristiques de l'écoulement
- contrôleur fixe	- trois voies par direction	- faible % de véhicules lourds
- un ou plusieurs cycles	- terre-plein central	- variabilité de la taille des pelotons au cours de la journée
- trois phases maximum	- délimitation des voies sur la chaussée	
- vitesse permise de 50 km/hre	- longueur du lien égale ou supérieure à 800 mètres	- disposition aléatoire des véhicules lourds dans le peloton
- aucune interaction avec l'opération du carrefour en aval	- bonne visibilité	- distribution des véhicules sur les voies typiques d'une artère à trois voies
- aucun stationnement en bordure du lien	- segment droit	
- lien peu signalisé	- pente nulle	
	- dégagement latéral de 2 mètres	
	- largeur des voies de 3,5 m	

4.2.8 Procédure pour la localisation et la sélection des sites.

Le site choisi doit correspondre aux caratéristiques déterminées précédemment. Il est donc localisé en milieu urbain où l'on observe une variation importante des débits au cours de la journée. A l'aide d'une carte, on identifie les artères principales de la région métropolitaine, à

l'extérieur des zones présentant de fortes interférences avec la circulation, comme le centre-ville par exemple.

Une seconde sélection est effectuée lors de la visite des sites retenus sur la carte. A ce moment, la longueur entre les feux, la possibilité d'observation et l'homogénéité du site au niveau de la capacité sont vérifiées.

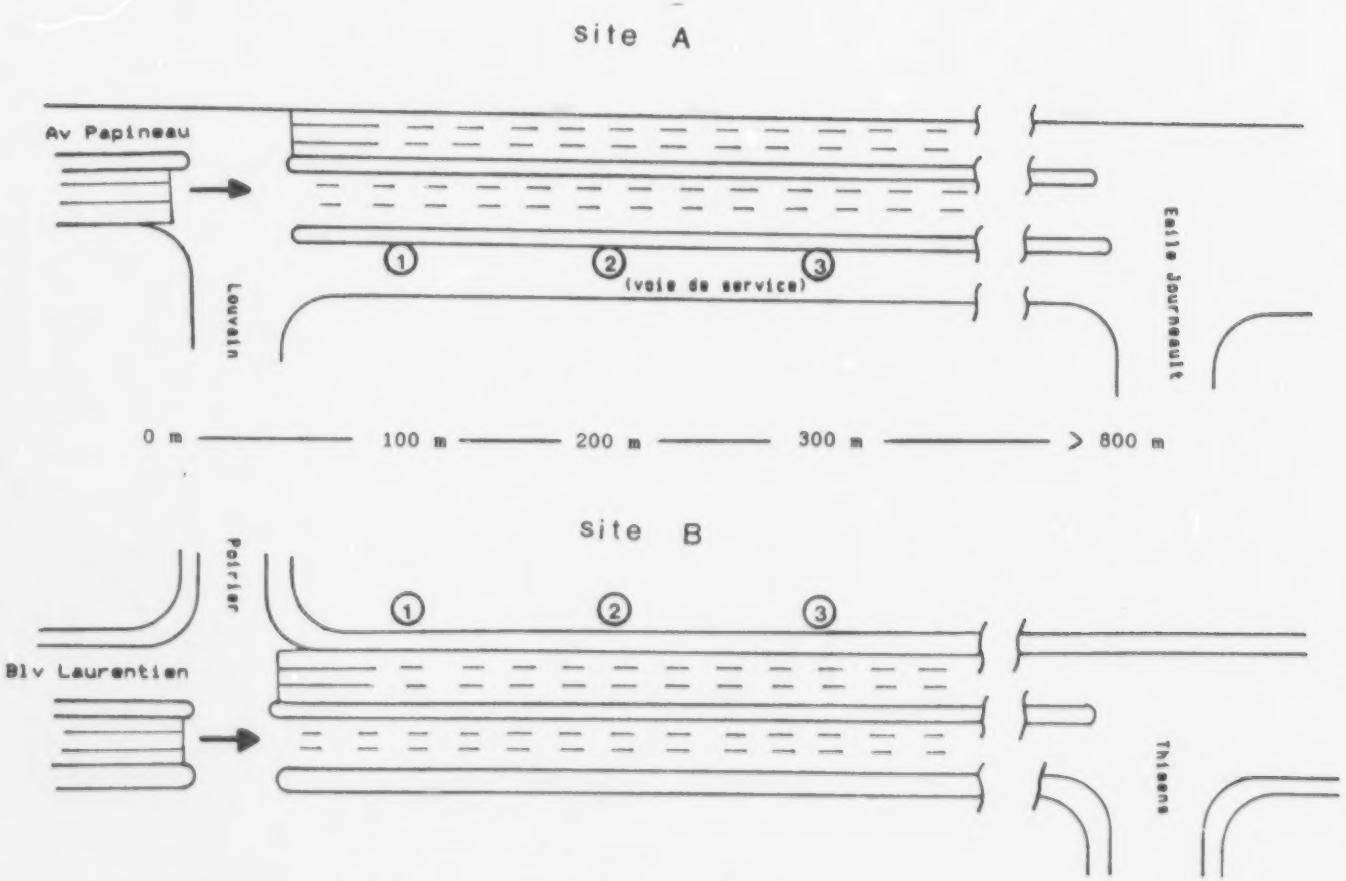
Les deux sites se rapprochant le plus des conditions décrites ci-haut sont localisés sur la rue Papineau entre Louvain et Emile Journeault et sur le boulevard Laurentien entre Poirier et Thimens. La figure 4.4 présente ces sites et la localisation des postes d'oservation.

4.2.9 Période d'essais

Une fois les sites choisis, une visite des lieux correspondant au moment de la journée où s'effectura l'enquête est nécessaire afin d'observer si le site respecte bien les caractéristiques déjà établies. De plus, une vérification du bon fonctionnement des appareils est effectuée à chacun des trois postes en s'assurant de la bonne visibilité des éléments à observer en plus d'anticiper les problèmes qui pourraient survenir lors de l'enquête. Toutes les caratéristiques externes des sites sont alors notées et l'emplacement exact des postes d'observation est déterminé.

FIGURE 4.4

Les deux sites sélectionnés pour l'enquête



4.2.10 Période d'enquête

Puisqu'on désire obtenir la dispersion en fonction de pelotons de grosseurs différentes, l'échantillonnage est effectué lorsque les débits sont forts, moyens et faibles. Les comptages sont donc effectués durant les périodes de pointe du matin, du soir et de l'hors-pointe.

4.2.11 Détermination des catégories de pelotons et de la durée de l'enquête

On veut environ quatre catégories de pelotons. Puisqu'il y a 50 pelotons par catégorie à échantillonner et que le cycle est d'environ 100 secondes, 200 pelotons répartis sur environ six heures de comptages doivent être recueillis.

En cas de pluie ou de problèmes techniques, l'enquête est reportée à la prochaine journée ouvrable.

4.2.12 Procédure d'observation

L'enquêteur note à l'aide du clavier le type de véhicule dès que la partie avant de celui-ci franchit la ligne de référence du poste d'observation. Il doit aussi noter le début et la fin de la phase verte du carrefour en amont, toujours à l'aide du clavier.

Toutes anomalies pouvant affecter le comportement du

peloton doivent aussi être enregistrées. Chaque enquêteur est muni d'un chronomètre et d'une formule de comptage au cas où des problèmes techniques surviendraient. Il doit, dans la mesure du possible, poursuivre les observations manuellement.

Dans tous les autres cas, il doit aller avertir les autres afin de corriger le problème pour reprendre l'enquête le plus tôt possible. Avant le début de chaque comptage, le fonctionnement de chaque ordinateur portatif est vérifié et synchronisé avec les autres.

4.3 TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Pour calibrer le facteur de dispersion alpha en fonction de la grosseur des pelotons, certaines opérations sur les données brutes sont nécessaires afin d'obtenir le profil moyen des pelotons à chacun des postes d'observation. Les données sont alors validées et agrégées par cycle, par intervalle et par grosseur de pelotons. Chacune de ces opérations est discutée dans la présente section.

4.3.1 Transfert des données sur un PC

Cette étape diffère des méthodes conventionnelles où le transfert s'effectue manuellement. Premièrement, les données sont transférées sur un ordinateur personnel via un cable RS-232 en utilisant la composante COMMUNICATION du logiciel SYMPHONY (vers 1.2). Le tableau 4.3 présente le format des

données transmises à l'ordinateur personnel par le TANDY 102. Les chiffres en tête de chaque bloc désignent le numéro du cycle alors que les lettres A, B et C indiquent la classe de véhicules (auto, bus, camion).

Chaque véhicule est associé à un temps de passage à l'exception de la première rangée des données où la séquence (0,0,0,3600) indique l'heure (s) du début du cycle. Le temps de parcours de chaque véhicule est obtenu par la différence entre le temps de passage à chacun des postes d'observation et celui de la tombée du feu vert. Ce format peut être modifié en intervenant directement dans le progamme de cueillette des données de l'ordinateur portatif TANDY 102.

Tableau 4.3

Format de sortie des données.

83				84				85				86				87			
A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS
0	0	0	2762	0	0	0	2832	0	0	0	2902	0	0	0	2972	0	0	0	3042
1	0	0	2775	1	0	0	2845	1	0	0	2914	1	0	0	2984	1	0	0	3055
1	0	0	2776	1	0	0	2846	1	0	0	2915	1	0	0	2986	1	0	0	3055
1	0	0	2779	1	0	0	2847	1	0	0	2917	1	0	0	2989	1	0	0	3058
1	0	0	2782	1	0	0	2848	1	0	0	2918	1	0	0	2989	1	0	0	3058
1	0	0	2783	1	0	0	2848	1	0	0	2920	1	0	0	2990	1	0	0	3058
1	0	0	2789	1	0	0	2854	1	0	0	2923	1	0	0	2994	0	0	1	3063
1	0	0	2792	1	0	0	2854	0	0	1	2925	1	0	0	2995	1	0	0	3064
1	0	0	2795	1	0	0	2857	1	0	0	2931	1	0	0	2999	0	0	1	3065
0	0	1	2801	1	0	0	2861	1	0	0	2932	1	0	0	3000	1	0	0	3067
0	0	1	2805	1	0	0	2861	1	0	0	2932	1	0	0	3001	1	0	0	3071
				1	0	0	2862	1	0	0	2933	1	0	0	3002	1	0	0	3071
				1	0	0	2864	1	0	0	2934	1	0	0	3002	1	0	0	3073
				1	0	0	2864	1	0	0	2935	1	0	0	3003	1	0	0	3074
				1	0	0	2864	1	0	0	2938	0	1	0	3004	1	0	0	3075
				1	0	0	2866	1	0	0	2939	1	0	0	3006	1	0	0	3077
				1	0	0	2866	1	0	0	2941	1	0	0	3007	1	0	0	3079
				1	0	0	2867	1	0	0	2942	1	0	0	3007				
				1	0	0	2868					1	0	0	3008				
												1	0	0	3009				
												1	0	0	3012				
8	0	2		19	0	0		16	0	1		19	1	0		14	0	2	

4.3.2 Procédure de validation des données

La procédure de validation est présentée à la figure 4.5. Elle est effectuée selon trois niveaux en comparant les données d'un poste à l'autre par rapport à la durée du cycle, la tombée de l'intervalle vert et le nombre total de véhicules dans le peloton. Sauf pour le cas de la tombée du vert, la validation des différentes données doit s'effectuer simultanément pour faciliter la localisation de l'erreur. Par exemple, l'erreur sur le nombre de véhicules dans le peloton peut être indiquée par le véhicule de tête qui est manquant.

i) validation de la tombée du vert

La précision du temps correspondant à la tombée du vert est importante puisque le temps de parcours de chaque véhicule est déterminé à partir de celui-ci. Etant donné que le type de contrôleur au carrefour est fixe, la validation de la tombée du vert et du cycle est instantannée. Les quelques erreurs observées sont de l'ordre d'une seconde.

ii) validation du véhicule de tête

Si le temps de parcours du véhicule de tête est trop court ou trop long, la valeur est ajustée selon la moyenne

observée en vérifiant si le total des véhicules dans le peloton à chacun des postes est identique. S'il ne l'est pas, il se peut que le véhicule de tête manque ou soit de trop. On ajuste alors en conséquence en ajoutant ou en retranchant un véhicule selon le cas. Le temps du véhicule suivant est aussi évalué simultanément pour confirmer l'ajustement.

iii) validation du nombre de véhicules dans le peloton.

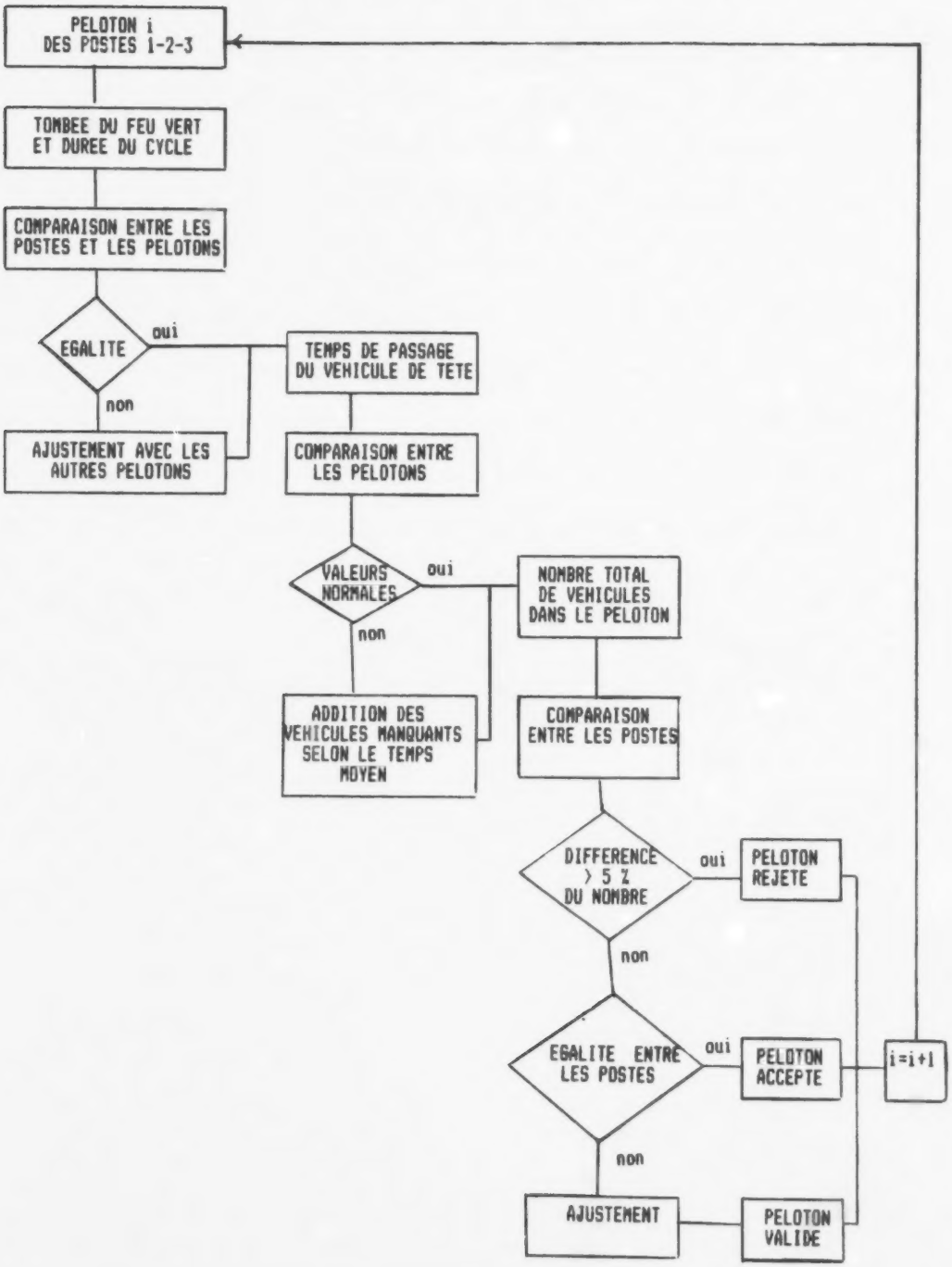
Lorsque la valeur du temps de parcours du véhicule de tête est normale et que le nombre de véhicules dans le peloton diffère, on ajuste en enlevant un véhicule dont le temps de parcours représente la moyenne ou, en ajoutant un véhicule près d'un camion s'il y a lieu.

L'égalité des données entre deux postes concernant la grosseur du peloton valide automatiquement les données du troisième poste.

Si les trois postes présentent des valeurs différentes, on normalise en fonction de la moyenne. L'ajustement consiste alors à placer le ou les véhicules manquants près d'un camion. Dans le cas où il n'y pas de camions, le temps de parcours moyen du peloton décide de l'emplacement du véhicule.

FIGURE 4.5

Procédure de validation



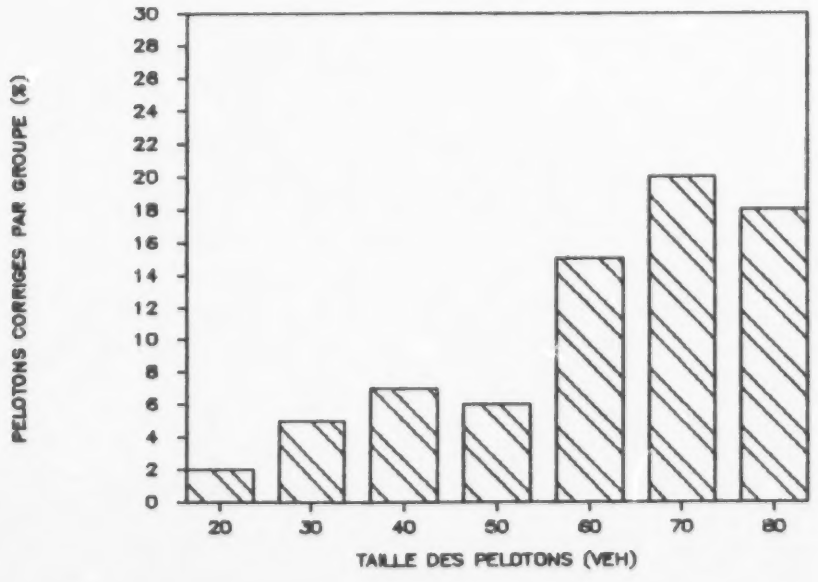
iv) Résultats de la validation

La procédure de validation est aride et très longue et ne peut s'informatiser que partiellement, car elle doit faire appel à des questions de jugement.

Pour le site A, sur 215 pelotons échantillonnés, 5 ont été rejetés et 23 ont été ajustés. Comme prévu, les erreurs ont été davantage observées sur les pelotons de plus grosse taille. Ces erreurs sont majoritairement expliquées par la présence de camions dissimulant des automobiles sur le côté opposé à l'observateur. La figure 4.5 montre la relation entre le nombre de pelotons corrigés et éliminés avec la taille des pelotons pour les deux sites.

FIGURE 4.6

Pelotons éliminés ou corrigés par rapport à la taille des pelotons



On peut donc conclure que la technique utilisée pour mesurer la dispersion est efficace et se compare avantageusement à plusieurs niveaux aux autres techniques généralement employées, et plus particulièrement, au niveau des erreurs introduites par la cueillette des données.

4.3.3 Compilation par intervalle

Pour calibrer le modèle de Robertson et procéder à l'analyse, les données sont compilées de façon à obtenir le profil de dispersion des pelotons à chacun des postes d'observation, pour chaque groupe de pelotons. Les étapes suivantes sont donc effectuées:

a) Choix de l'intervalle de compilation

Puisque nous sommes dans le cas discret, il faut déterminer la durée de l'intervalle de compilation. S'il est trop grand, on aura une perte d'information. Par contre s'il est trop petit, l'erreur attribuée à l'observation et au temps de réaction de l'observateur devient importante.

Puisqu'en général les enquêtes portant sur la dispersion des pelotons utilisent un intervalle de deux secondes, les données de notre expérience sont compilées avec cette valeur.

b) Agrégation des données

Le temps de parcours est obtenu en faisant la différence entre le temps de passage et le temps correspondant à la tombée du feu vert. Il est transformé en intervalle de deux secondes pour les besoins de l'analyse ultérieure. Le nombre de véhicules dans chaque intervalle est alors obtenu (tableau 4.4).

TABLEAU 4.4

Nombre de véhicules par intervalle de 2 (s) par cycle.

CYCLE	INTERVALLE															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0	0	0	0	0	0	4	3	2	3	3	1	3	5	2	
2	0	0	0	1	1	2	2	3	4	2	0	3	2	2	2	
3	0	0	0	0	0	4	0	1	2	4	2	5	3	3	2	
4	0	0	0	0	0	0	4	4	1	3	3	2	4	2	2	
5	0	0	0	1	1	1	2	3	3	1	3	3	0	4	1	
6	0	0	0	0	1	1	3	2	3	4	2	2	3	2	2	
7	0	0	0	1	1	1	3	3	4	2	2	4	3	1	3	
8	0	0	0	0	2	1	2	1	3	2	4	4	2	3	4	
9	0	0	0	0	1	2	1	0	3	4	3	6	3	2	4	
10	0	0	0	1	0	1	3	1	2	4	4	3	2	3	3	
11	0	0	0	1	0	2	2	1	2	2	3	3	3	1	1	
12	0	0	0	0	0	2	1	0	3	3	1	5	2	3	2	
13	0	0	0	0	0	0	2	2	1	4	2	2	2	4	3	
14	0	0	0	0	0	0	3	3	3	4	3	2	2	1	3	
15	0	0	0	0	0	1	2	1	3	2	5	2	4	2	0	
TOTAL	0	0	0	5	7	18	34	28	39	44	40	37	38	34	24	
MOY.	0	0	0	.3	.5	1.2	2.3	1.9	2.6	2.9	2.7	2.5	2.5	2.3	1.6	

A partir de ces tableaux, le profil moyen d'un peloton d'une grosseur donnée à chacun des postes d'observation est obtenu. On peut alors tirer des informations importantes qui seront utilisées lors de l'analyse. Les données compilées de l'enquête au site A sont présentées en annexe.

c) Statistiques sur la première enquête

Le tableau 4.5 présente différentes statistiques concernant la première enquête. Elles sont nécessaires pour effectuer l'analyse, sujet du prochain chapitre. Les données de l'expérience sont présentées à l'annexe E.

TABLEAU 4.5

Statistiques sur la première enquête

POSTE	GROUPE	TEMPS DE PARCOURS TETE (2s)	PELOTON (2s)	# VEHICULES	# PELOTONS	PELOTON MOYEN	VITESSE TETE (km/h)	VITESSE PELOTON (km/h)	CYCLE (s)	VERT (s)	DEBIT (veh/h)	CAPACITE (veh/h)	RAPPORT d/c
	1	3.96	10.26	1031	54	19	45.45	17.54	70	35	977	2983	0.33
1	2	3.79	10.39	884	33	27	47.49	17.32	70	35	1389	2983	0.47
	3	3.45	10.39	2186	60	36	52.17	17.32	100	60	1296	2412	0.54
	4	3.87	16.04	3239	53	61	46.51	11.22	100	60	2196	3600	0.61
	1	6.78	13.07	1031	54	19	53.10	27.54	70	35	977	2983	0.33
2	2	6.55	13.29	884	33	27	54.96	27.09	70	35	1389	2983	0.47
	3	6.28	13.61	2186	60	36	57.32	26.45	100	60	1296	2412	0.54
	4	6.45	18.95	3239	53	61	55.81	19.00	100	60	2196	3600	0.61
	1	9.28	15.75	1031	54	19.09	38.79	22.86	70	35	982	2983	0.33
3	2	9.15	16.27	884	33	26.79	39.34	22.13	70	35	1378	2983	0.46
	3	8.7	16.46	2186	60	36.43	41.38	21.87	100	60	1311	2412	0.54
	4	8.98	21.84	3239	53	61.11	40.09	16.48	100	60	2200	3600	0.61

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RESULTATS

5.1 PROCEDURE DE CALIBRAGE

La calibration du modèle de Robertson consiste à faire varier les paramètres alpha et béta du facteur de lissage "F" de telle sorte que l'écart entre les distributions simulées et observées soit minimum.

$$F = 1/(1+\alpha\beta T)$$

La majorité des études sur le modèle de Robertson ont concentré leur analyse principalement sur la calibration du facteur alpha, considérant la valeur du paramètre béta fixe à 0,8. Selon McCoy (1982), le peu de recherches effectuées sur le paramètre béta s'explique entre autres par le fait que dans le logiciel TRANSYT, le choix de l'usager pour la simulation des pelotons se limite au paramètre alpha. Il est aussi plus facile de comparer les valeurs du paramètre alpha d'une étude à une autre lorsque béta est fixé à 0,8.

Puisque le paramètre béta est le rapport du temps de parcours du premier véhicule dans le peloton sur le temps de parcours moyen du peloton, il est donc logique de penser que lorsque la friction augmente pour un peloton donné, ce rapport diminue. Les études traitant de sa calibration ont

confirmé que, comme dans le cas de alpha, béta varie en fonction des caractéristiques du site.

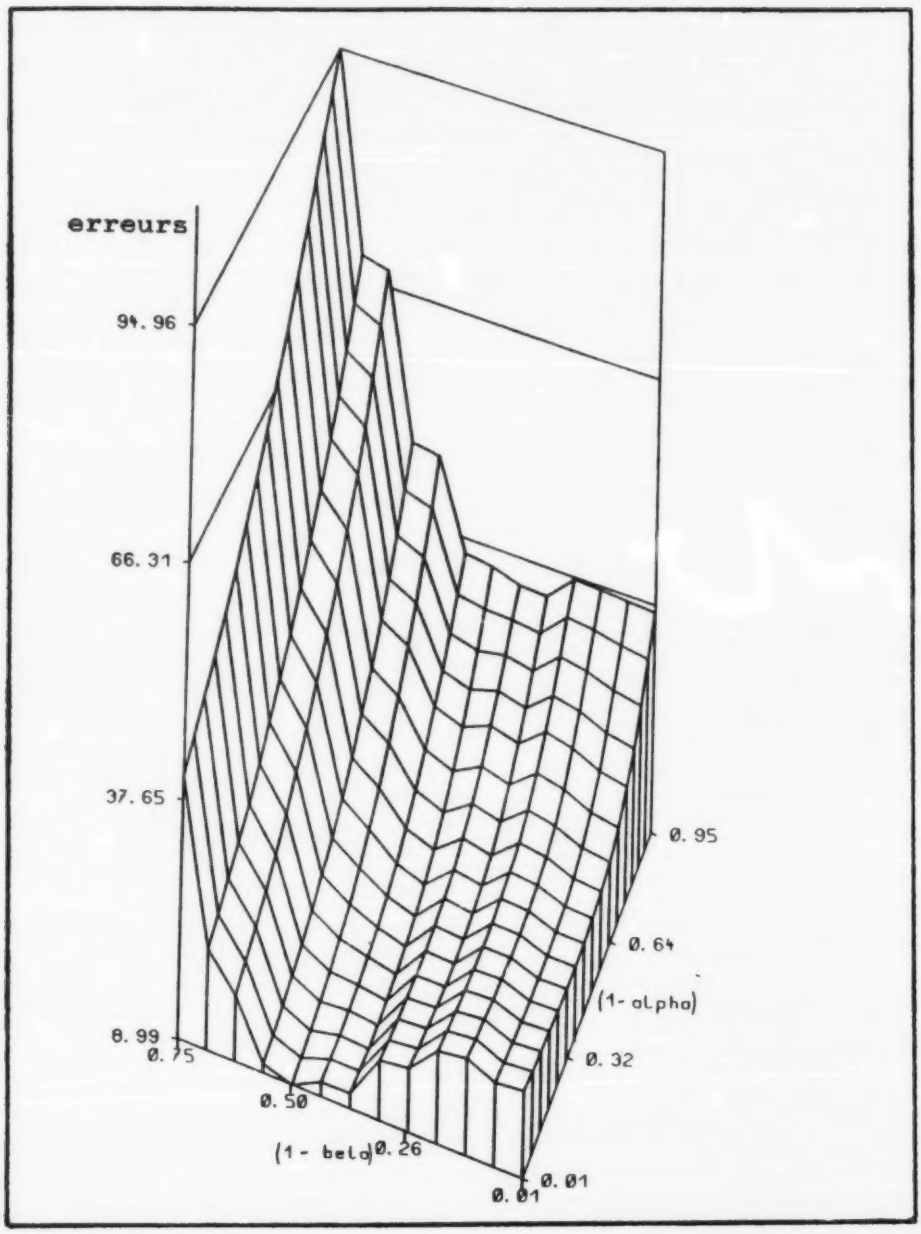
Pour trouver la combinaison des paramètres alpha et béta qui minimise l'erreur entre les distributions observées et simulées, la méthode utilisée généralement par les chercheurs consiste à faire varier alpha entre 0 et 1 en fixant béta jusqu'à ce que l'on trouve un minimum. L'opération est répétée pour différents béta.

Axhausen et Körling (1986) soulignent le danger d'utiliser cette méthode séquentielle pour la calibration des paramètres alpha et béta. Prenons par exemple la surface des erreurs en fonction des paramètres béta et alpha présentée à la figure 5.1 obtenue par la somme des différences au carré. Plusieurs minimum caractérisent la fonction. Donc, en utilisant cette méthode, il existe un risque de s'arrêter sur un minimum qui n'est pas l'optimum recherché.

Des algorithmes comme Newton-Ralphson, Marquardt ou la méthode du Simplex sont davantage recommandés pour la calibration de deux ou plusieurs paramètres. Caceci et Cacheris (1984) évaluent ces méthodes en insistant davantage sur l'utilisation de la méthode du Simplex pour la calibration d'une équation comportant deux paramètres.

FIGURE 5.1

Surface de l'erreur entre
les distributions observées et simulées



Source Axhausen (1986)

Pour notre étude, le paramètre alpha est calibré en fixant béta à 0,8 pour les raisons suivantes;

- facilité de comparaison entre les sites et les études antérieures;
- béta est fixé à 0,8 dans TRANSYT;
- facilité de voir l'effet des différentes grosseurs de pelotons sur alpha lorsque béta est fixé à 0,8.

Pour obtenir l'erreur entre les distributions simulées et observées, différentes méthodes de calculs peuvent être utilisées. Elles sont discutées en détails par D'Agostino et Stephens (1986). Pour notre analyse, la statistique du khi-deux a été retenue puisqu'elle peut être utilisée pour vérifier d'éventuelles hypothèses. En simulant différentes valeurs de alpha, on retient l'indice qui représente la plus grande similitude entre les deux distributions.

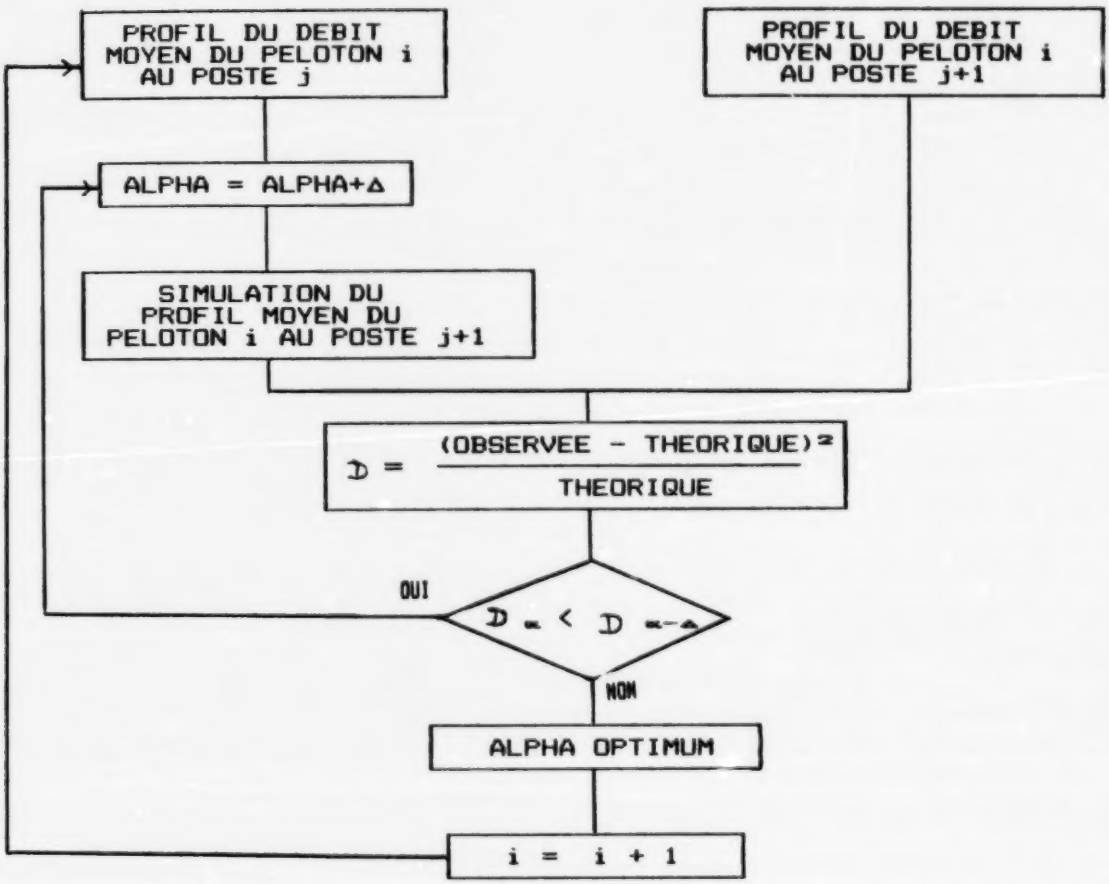
L'algorithme utilisé pour la recherche de l'optimum est présenté à la figure 5.2.

5.2 CHOIX DU SYSTEME ET DU LOGICIEL D'ANALYSE

Etant donné la capacité mémoire limitée du TANDY 102, le traitement et l'analyse de l'information doivent s'effectuer sur un ordinateur plus puissant.

FIGURE 5.2

ALGORITME DE RECHERCHE SEQUENTIELLE
UTILISE DANS LE MODELE CALIBRA



Le niveau d'avancement technologique actuel de la micro informatique permet d'assurer un traitement efficace de l'information malgré la quantité de données à manipuler. Pour le transfert et la compilation des données, le logiciel SYMPHONY (vers 1.2) est utilisé à cause de ses possibilités de communication, d'analyse et de traitements des données.

5.3 ELABORATION DU PROGRAMME DE CALIBRATION CALIBRA.

Puisque les données se trouvent sous la configuration du logiciel SYMPHONY, la conception du programme de calibration est effectuée en utilisant ce logiciel. La description des modules ainsi que la feuille de travail montrant les relations entre les cellules du programme sont présentées à l'annexe D.

La fonction du programme est de simuler différentes valeurs de alpha dans le modèle de Robertson en comparant les résultats obtenus avec la distribution observée. En utilisant la statistique du khi-deux, le programme détermine le facteur alpha donnant la meilleure représentation de la distribution observée.

5.4 ANALYSE DES RESULTATS POUR LE SITE A

5.4.1 Calibrage du facteur alpha en fonction des 4 groupes

Une première calibration consiste à simuler les débits au poste 200 à partir des débits observés au poste 100 selon

l'algorithme présenté à la figure 5.2. On détermine alors le facteur alpha donnant la meilleure concordance entre les distributions théoriques et observées au poste 200. De même, le facteur alpha optimum est déterminé au poste 300. Le tableau 5.1 présente les résultats de la calibration du premier site.

La valeur de alpha aux postes 200 et 300 est à peu près constante. Ceci nous indique que les frictions à l'intérieur et à l'extérieur du peloton sont uniformes. La figure 5.3 compare l'histogramme observé au poste 300 à la distribution simulée à partir des données du poste 100 en utilisant alpha calibré pour le peloton du dernier groupe (74 véhicules).

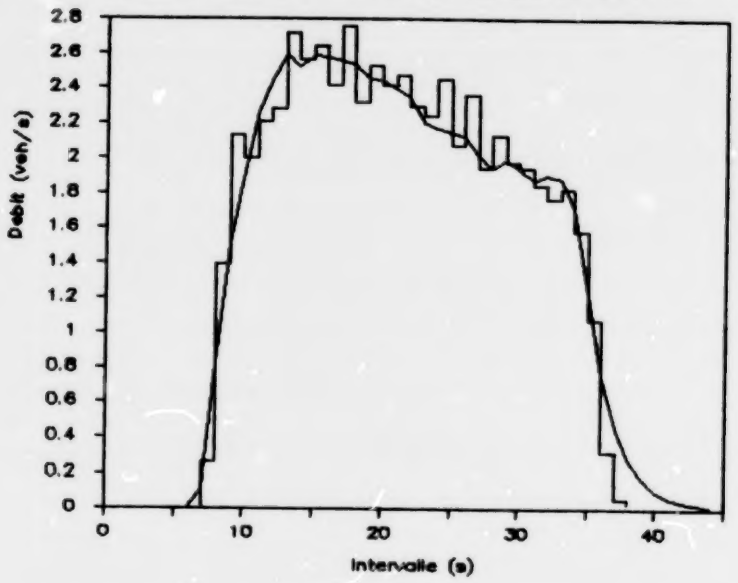
TABLEAU 5.1

Résultats de la calibration
du premier site pour les quatre groupes

Groupe	K_{opt1}	K_{opt2}	K_{moy}
1	0,39	0,34	0,36
2	0,41	0,40	0,41
3	0,54	0,47	0,50
4	0,34	0,39	0,36

FIGURE 5.3

Histogramme observé et distribution simulée au poste 300



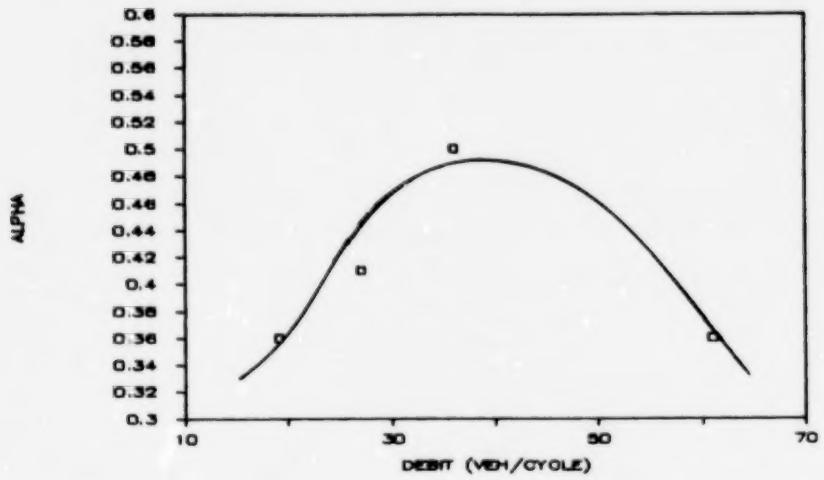
Les résultats de la calibration vont dans le même sens que les valeurs proposées dans TRANSYT par rapport à l'augmentation de la friction (tableau 1.5). Ils semblent aussi confirmer nos hypothèses de départ (chapitre 3) à savoir que la dispersion varie en fonction du débit et qu'à une certaine limite d'interférence, elle diminue. Le graphique de la figure 5.4 présente le phénomène.

5.4.2 Subdivision en sous-groupes

Le quatrième point du graphique de la figure 5.4 semble confirmer l'hypothèse que la dispersion diminue lorsqu'une certaine limite d'interférence est atteinte. Afin

FIGURE 5.4

Résultats de la calibration
(site A)



de voir l'allure de la courbe plus en détail, les groupes sont subdivisés. Une erreur est toutefois engendrée par cette subdivision.

Lors de la conception de l'enquête (chapitre 4), étant donné un niveau de confiance de 95% et une erreur tolérée sur la moyenne de 10%, un échantillon de 50 pelotons par groupe était jugé représentatif du comportement de la population des pelotons de ce groupe. Pour ces conditions, la variance de la population était estimée à 0,37.

Connaissant la variance de l'échantillon actuel, l'erreur sur le temps de parcours moyen attribuée à cette division est calculée en utilisant la distribution de Student pour un niveau de confiance de 95%, puisque la taille des échantillons est généralement inférieure à 30.

$$t = \frac{\bar{X}-\mu}{s/\sqrt{n}}$$

où

$\bar{X}$ = moyenne de l'échantillon
μ = moyenne de la population
s = écart-type
n = taille de l'échantillon

L'erreur générée sur le temps de parcours moyen est déterminée au tableau 5.2 pour le poste 200 du site A.

Tableau 5.2

Erreurs générées par la subdivision des groupes (site A, poste 2)

GROSSEURS PELOTONS	DEGRÉS DE LIBERTÉ n-1	TEMPS DE PARCOURS MOYENS (2s) $\bar{X}$	ECART-TYPE s	STUDENT $t\alpha_{/2}$ (,05)	ERREURS SUR LE TEMPS DE PARCOURS (2s)
16	22	12.9	0,46	2,07	± 0,20
19	54	13.1	0,47	1,96	± 0,13
27	33	13,3	0,44	2,04	± 0,16
36	60	13,6	0,36	1,96	± 0,09
43	13	13,9	0,38	2,16	± 0,23
50	13	18,0	0,23	2,16	± 0,14
54	26	18,5	0,27	2,06	± 0,11
61	53	19,0	0,27	1,96	± 0,07
65	20	19,1	0,29	2,09	± 0,14
67	47	19,3	0,30	1,96	± 0,09
74	10	19,8	0,31	2,23	± 0,21
76	7	19,6	0,32	2,37	± 0,29

Une analyse de sensibilité est alors effectuée en injectant l'erreur générée par chacun des sous-groupes dans le modèle de Robertson (tableau 5.3). La différence obtenue entre les facteurs alpha nous indique que l'erreur engendrée sur le facteur de dispersion par la subdivision est négligeable dans tous les cas.

Tableau 5.3

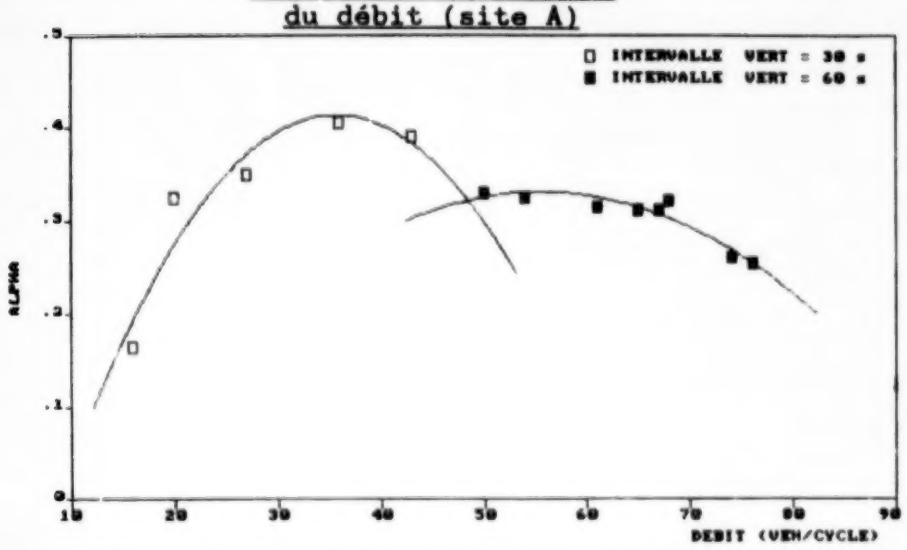
Sensibilité du modèle à l'erreur générée par la subdivision

GROSSEURS PELOTONS	TEMPS DE PARCOURS MOYEN(2s)	ALPHA OPTIMUM	ERREURS SIMULEES	ALPHA OBTENUS	SENSIBILITE DU MODELE A L'ERREUR
16	12,85	0,17	± 0,20	0,17	0
19	13,07	0,33	± 0,13	0,32	0
27	13,28	0,35	± 0,16	0,34	0
36	13,61	0,41	± 0,09	0,41	0
43	13,93	0,39	± 0,23	0,37	0
50	18,00	0,33	± 0,14	0,33	0
54	18,54	0,33	± 0,11	0,33	0
61	18,95	0,32	± 0,07	0,32	0
65	19,14	0,31	± 0,14	0,31	0
67	19,26	0,32	± 0,09	0,32	0
74	19,82	0,26	± 0,21	0,26	0
76	19,55	0,26	± 0,29	0,26	0

La figure 5.5 présente les résultats de la simulation avec le programme CALIBRA. La discontinuité est causée par les pelotons échantillonnés à la période de pointe où le cycle était plus court.

FIGURE 5.5

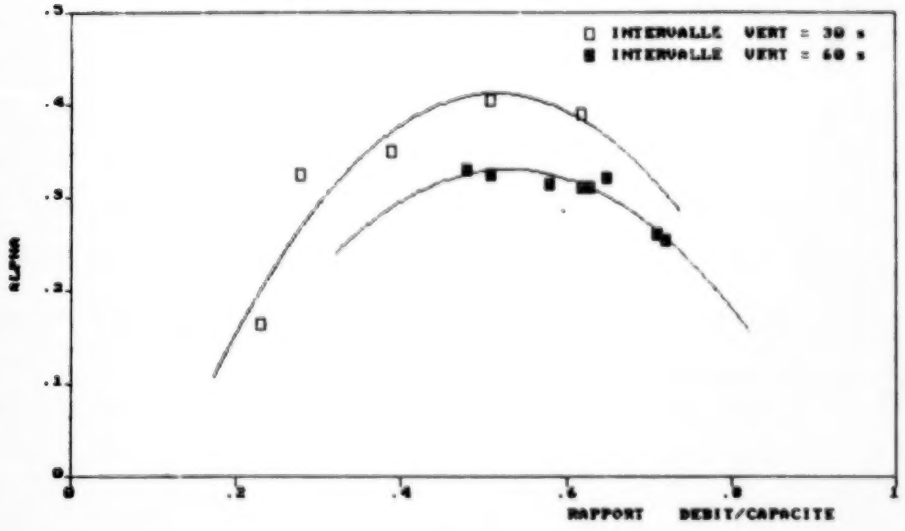
Dispersion en fontion du débit (site A)



Si nous calculons le peloton maximum par cycle en fonction de l'intervalle vert et que nous normalisons la grosseur suivant cette valeur, nous obtenons le graphique présenté à la figure 5.6.

FIGURE 5.6

Dispersion en fonction du débit normalisé (site A)



La première courbe sur le graphique correspond à la période creuse et la deuxième, à la période d'affluence. La différence d'amplitude entre ces deux courbes est expliquée par la variation de la friction externe au cours de l'enquête. Cette variation a été observée au niveau de la durée du cycle qui alternait entre 100 secondes pour la période d'affluence et 70 secondes pour la période creuse.

Ces résultats peuvent s'expliquer par la durée du cycle qui a pour effet de grouper davantage les véhicules à la ligne d'arrêt. La fréquence d'interruption du flux diminuera la capacité, augmentant ainsi la friction externe. A la limite, s'il n'y a pas d'interruption, la dispersion sera causée par la friction interne seulement.

L'hypothèse concernant l'accroissement de la dispersion causée par la friction interne lorsque la friction externe augmente, semble donc se confirmer par ces résultats.

5.5 ANALYSE DES RESULTATS POUR LE SITE B

En utilisant la même procédure de calibration que pour le premier site, on obtient les résultats présentés au tableau 5.4. L'erreur sur les résultats est considérée comme étant dans le même ordre de grandeur que pour le premier site.

Tableau 5.4

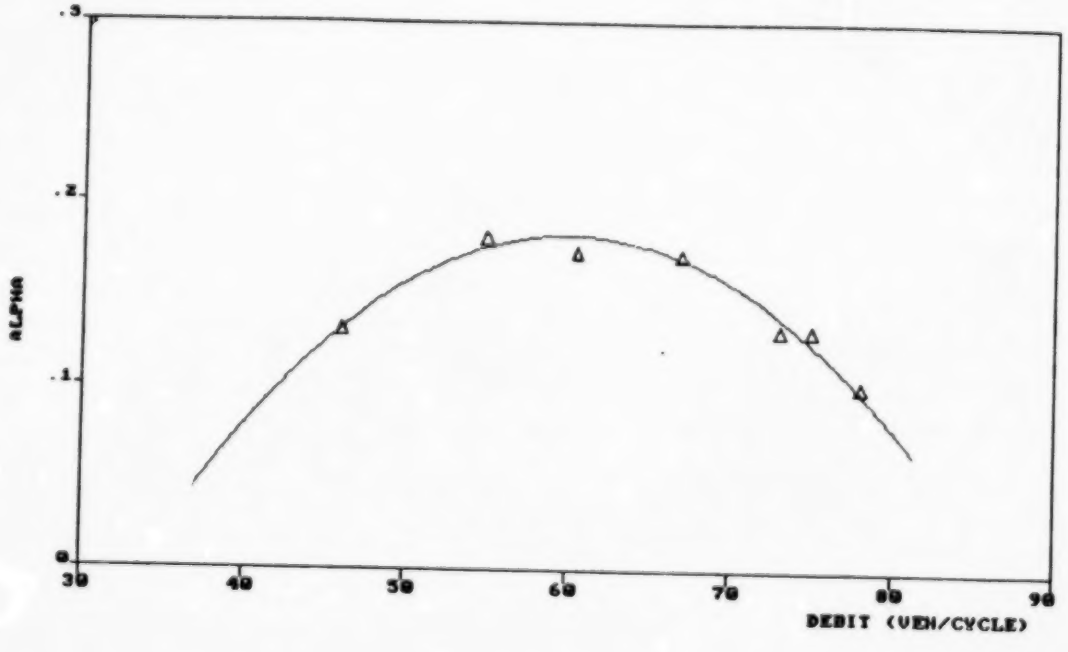
Résultats de la calibration de alpha en fonction de la grosseur des pelotons pour le site B

GROSSEUR DU PELOTON	ECHAN-TILLON	ALPHA OPTIMUM
46	7	0,13
55	12	0,18
60	17	0,16
67	19	0,17
73	27	0,13
75	12	0,13
78	18	0,10

Graphiquement, on obtient une courbe similaire à celle du premier site, confirmant davantage nos hypothèses de départ (figure 5.7).

FIGURE 5.7

Dispersion en fonction du débit (site B)

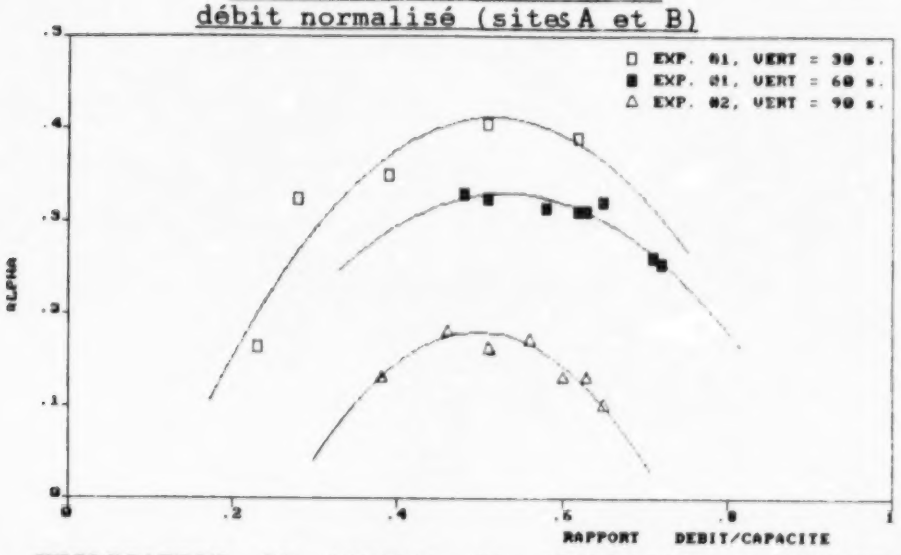


5.6 ANALYSE COMPARATIVE

En normalisant par rapport au peloton maximum et en incorporant sur un même graphique les résultats des sites A et B, il est alors possible de voir la différence d'amplitude entre les courbes causée par la variation du cycle (figure 5.8).

FIGURE 5.8

Dispersion en fonction du débit normalisé (sites A et B)



5.7 UTILISATION DU MODELE DE SIMULATION MICROSCOPIQUE PLATSIM2 (Platoon simulation version 2)

5.7.1 Description du modèle

PLATSIM2 est un modèle de simulation microscopique adapté par Manar (1987). Sa structure initiale est basée sur l'algorithme développé par Fox et Lehman (1967). Il a été modifié afin de permettre la simulation sur plus d'une voie

et de tenir compte des possibilités de dépassements.

Le modèle utilise la loi d'interaction (car following) tout en considérant les conditions retrouvées en réalité telles que le comportement du conducteur face à différents stimuli et les performances mécaniques des véhicules. L'information produite par le modèle décrit en détail le mouvement de chaque véhicule dans le peloton.

Différents tests ont été effectués dans le but de vérifier la réaction du modèle par rapport à différents changements. Dans tous les cas, le modèle était conforme aux différentes lois et propriétés dynamiques de la circulation.

Pour ces raisons, le modèle a été utilisé pour générer des profils de pelotons. Le but de l'utilisation de ces profils est de vérifier l'allure de la courbe représentant la dispersion en fonction de la grosseur des pelotons.

5.7.2 Calibration du modèle

Le modèle a été calibré à partir des données de l'expérience du premier site. Certains paramètres du modèle ont alors été ajustés en fonction de trois pelotons de grosseurs différentes. Les éléments utilisés pour la calibration sont la vitesse moyenne, la composition du débit, le temps d'arrivée des véhicules de tête aux différents postes d'observation et le nombre de véhicules par intervalle de deux secondes.

5.7.3 Simulation avec le modèle

Deux simulations ont été réalisées avec différentes conditions de circulation microscopique. Ainsi, la première a été effectuée en minimisant les effets internes tels que la présence de véhicules lourds. Au total, 285 pelotons ont été générés et groupés en 19 pelotons moyens de grosseurs différentes.

Dans le cas de la deuxième simulation, 270 pelotons ont été produits et groupés en 18 pelotons. Les conditions de circulation lors de cette simulation comportaient plus de frictions que la première.

5.7.4 Calibration du facteur alpha

En utilisant la même procédure de calibration pour les pelotons observés, le facteur alpha optimum est obtenu en fonction des différents pelotons théoriques. Les résultats des deux simulations sont présentés au tableau 5.5.

Tableau 5.5

Résultats de la calibration des pelotons générés par les simulations un et deux

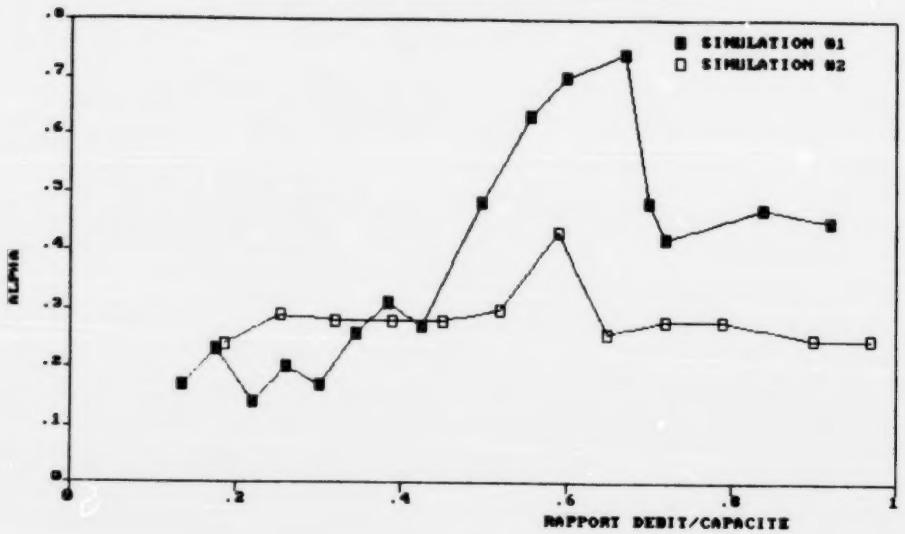
SIMULATION 1				SIMULATION 2			
Peloton	Alpha	Peloton	Alpha	Peloton	Alpha	Peloton	Alpha
17	0,17	75	0,70	14	0,24	64	0,26
22	0,23	84	0,74	19	0,29	68	0,25
28	0,14	87	0,48	24	0,28	73	0,25
33	0,20	90	0,42	29	0,28	76	0,23
38	0,17	105	0,47	34	0,28	85	0,32
43	0,26	115	0,45	39	0,30	90	0,31
48	0,31	126	0,47	44	0,43	95	0,33
53	0,27	135	0,45	49	0,26	105	0,38
62	0,48	145	0,53	54	0,28		
70	0,63			59	0,28		

La figure 5.8 présente les courbes normalisées en fonction du nombre maximal de véhicules dans le peloton. La différence entre les courbes ne peut être expliquée que par le choix des paramètres du modèle caractérisant les simulations.

Ces paramètres microscopiques (l'accélération des véhicules, la distance entre les véhicules, etc..) ne cadrent pas dans la présente étude qui utilise des variables macroscopiques pour expliquer la dispersion.

FIGURE 5.9

Dispersion en fonction du débit normalisé(simulations 1 et 2)



Les résultats ne peuvent pas non plus être comparés quantitativement avec ceux de l'expérience à cause du choix arbitraire des paramètres du modèle et des données microscopiques non-disponibles pour notre enquête. Cependant, l'allure des courbes confirme encore une fois les hypothèses élaborées au chapitre trois.

Le changement du comportement du peloton passé une certaine valeur du rapport débit sur capacité est observé dans tous les cas. Il peut être expliqué en analysant la relation de l'espacement en fonction du débit.

Baass et Lefebvre (1987) traitent de cet aspect en faisant le lien avec les modèles macroscopiques de circulation élaborés par Drew (1968) et en discutant des différents facteurs pouvant représenter la friction interne.

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans cet ouvrage, la délimitation de la problématique caractérisant la modélisation de la dispersion des pelotons a permis d'élaborer un concept hypothétique de dispersion. Celui-ci est expliqué à partir de la friction interne du débit en relation avec la friction externe du site.

Afin de vérifier les hypothèses formulées concernant cette approche, deux enquêtes ont été effectuées sur des sites similaires. Pour confirmer davantage les résultats, un modèle de simulation microscopique dont le comportement coïncide avec les phénomènes de circulation observés en réalité a été utilisé.

Dans tous les cas, les résultats correspondent aux hypothèses élaborées au chapitre trois.

Ainsi, pour une capacité donnée la dispersion augmente avec le débit représentant la friction interne. Toutefois, lorsque l'augmentation du débit sur un site atteint un rapport débit sur capacité d'environ 0,60, le comportement du peloton change. Passé cette valeur, la dispersion diminue de façon contraire au concept proposé dans TRANSYT.

Baass et Lefebvre (1987) expliquent ce changement de comportement en analysant l'espacement entre les véhicules en fonction du débit.

Deuxièmement, l'analyse a montré que si la friction externe augmente sur le site, l'amplitude de la courbe représentant la dispersion reliée à la friction interne s'accroît aussi. Cette hypothèse a été vérifiée par la variation du cycle sur les sites.

La réduction de la durée du temps de vert a pour effet d'arrêter et de regrouper un plus grand nombre de véhicules à la ligne d'arrêt pour un débit identique. Dans ces conditions, il y a plus de frictions internes entre les véhicules au moment de la tombée du vert car les véhicules quittent le carrefour avec une vitesse initiale nulle et une densité maximale.

Si l'intervalle vert est plus grand, le peloton se disperse moins parce qu'il n'est pas arrêté entièrement par le feu. La densité est alors plus faible et la dispersion est surtout attribuée à la différence de vitesses entre les véhicules.

Ce phénomène a été observé au site B, où presque la totalité des pelotons échantillonnés n'était pas affectée par le feu du carrefour en amont. Le résultat se représente sur une courbe de dispersion interne très faible.

On peut donc supposer que sur une artère sans feu de circulation, pour des débits relativement forts, la dispersion est presque nulle. L'amplitude de la courbe de dispersion correspondant à la variation de la friction interne tend vers zéro.

La divergence dans les résutats de la calibration de certaines études (tableau 2.1) pour des sites similaires pourrait être ainsi expliquée à partir de ces résultats. L'information présentée dans ces articles ne permet pas cependant, d'identifier le ou les facteur(s) externe(s) en cause.

On peut supposer aussi que pour une durée de cycle identique entre les deux sites enquêtés, les courbes se confondent.

Il reste donc à démontrer que les courbes obtenues pour les sites de l'expérience sont les mêmes pour des cycles équivalents sur des sites différents, pour des rapports débit sur capacité identiques .

Suite à ces résultats, d'autres études permettraient d'obtenir la relation mathématique entre les frictions internes et externes.

En incorporant cette relation dans le programme TRANSYT, le choix qualitatif du facteur de dispersion et les erreurs qui en découlent seraient éliminés. De plus, la dispersion s'ajusterait sur chaque lien au lieu du réseau en entier, optimisant davantage les résultats de la coordination des feux.

BIBLIOGRAPHIE

AGOSTINO, R. et al (1986) Goodness-of-fit techniques. Marcel Dekker, inc. New York and Basel, 1986.

ASHWORTH, R. et EL-REEDY, T. (1978) Platoon dispersion along a major road in Sheffield. Traffic Engineering & Control, april 78, p 186-189.

AXHAUSEN, K. et al (1987) Some measurements of Robertson's platoon dispersion factor. Paper presented at the 66th annual meeting of TRB Wash. D.C.

BUCHANAN (1963) Rapport commandé par le ministère Britanique des Transports, Angleterre, 1963

BAASS, K. (1982) Méthodes mathématiques de coordination des feux de circulation; un tour d'horizon. Présenté au Congrès de l' AQTR, mars 1982, chapitre 13, p 1-18.

BAASS,K. et al (1987) L'utilisation des ordinateurs portatifs pour la saisie de données en circulation. Routes et Transports XVII-1, Jan 1987, p. 28-32

BAASS, K. et al (1987) Analysis of platoon dispersion with respect to volume. Article soumis au TRB. Ecole Polytechnique de Montréal.

BONSALL, P. et al (1987) Portable data capture devices for transport sector surveys. Traffic Eng. & Control. Avril 1987, p. 216-223

CACECI, S. et al (1984) Fitting Curves to Data: the Simplex algorithm is the answer. BYTE, may 1984, p. 340-362.

CASTLE, D. (1986) Platoon Dispersion over Long Road Links. Transportation Research record # 1021, jan 1986, p 36-44.

COLLINS, J. et GOWER, P. (1972) Dispersion of traffic platoons on A4 in Hounslow. TRRL Supplementary report 29UC, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1974

COUTURE, L. (1982) La coordination des feux de circulation sur une artère pour optimiser la bande verte en considérant les retards. Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 1982

DAGENAIS, J.P. (1982) Ironie du char. Essai édité à compte d'auteur, Montréal, 1982, 208 p.

DANDY, G. et al (1984) Sample Size Requirements for Traffic Surveys. The 12 th ARRB Conference Hobart, Tasmania 1984, p.132-142

DIXON, M.L. (1972) A study of the distribution of journey times of vehicles leaving traffic signals. Thesis, University of Salford, 1972, 101 p.

DOCKERTY, A. (1967) Traffic platoon dispersion. Surveyor, 11 feb 1967, p. 25-27

DREW, D. (1968) Traffic Flow Theory and Control. Mc Graw Hill, N.Y.

FOX, P. et al (1967) Safety in car following. Newark College of Engineering, Newark, New Jersey.

GRACE, M. et al (1964) A theory of the diffusion of traffic platoons. Operations Research, vol 12, #2, march-april 1964, p 255-275.

GRAHAM, E.F. et al (1962) A study of unrestricted platoon movement of traffic. Traffic Engineering, april 62, p 11-13.

HERMAN, R. et al (1964) Behavior of traffic leaving a signalized intersection. Traffic Engineering & Control, jan. 64, p 529-533.

HILLIER J.A. et al (1967) The Synchronisation of Traffic Signals for Minimum Delay. Transportation Science, Vol 1 #2, mai 67, p. 81-94.

HIROSHI, I. et al (1975) Road Traffic Control. University of Tokyo press, 1975.

LAM, J. (1977) Studies of a platoon dispersion model and its pratical implica-tion. Proceedings of the seventh international symposium on transportation and traffic theory. Kyoto, 1977, p 119-144.

LE CORBUSIER (1980) Urbanisme. Les éditions Arthaud, Paris 1980, 296 p.

LEFEBVRE, S.(1986) Discussion sur le modèle de diffusion. Document de référence disponible à la section Génie des Transports, Ecole Polytechnique de Montréal.

LEFEBVRE, S. (1987) Analyse des données des enquêtes sur la dispersion des pelotons. Document de référence disponible à la section Génie des Transports, Ecole Polytechnique de Montréal.

LEWIS, B. (1958) Platoon movement of traffic from an isolate signalized intersection. Highway Research Record, bul. #178, 1958, p 1-11.

LIGHTHILL, M.J. et al (1955) On kinematic waves. I- Flood movement in long rivers. II- A theory of traffic flow on long crowded roads. Proc. Roy. Soc. (Lond), A, v229(117.8), may 1955, p 281-345.

MANAR, A. (1987) Modèle de simulation pour la dispersion des pelotons. Mémoire de maitrîse, Ecole Polytechnique de Montréal.

MANUAL ON UNIFORM TRAFFIC CONTROL DEVICES FOR STREETS AND HIGHWAYS (1948) Public Roads Administration, Washington, D.C. , 1948.

MARQUARDT, D.W. (1963) An Algorithm for Least Squares Estimation of Non-linear Parameters. Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics, 11, 431, 1963.

MASSARD, J (1925) Rapport publié dans Le Journal, Paris, 27 oct 1925.

McCOY, P. et al (1983) Calibration of TRANSYT platoon dispersion model for passenger cars under low-friction traffic flow conditions. Transportation Research Record 905, 1983, p 48-52

MICHALOPOULOS P.G. et al (1980) Platoon dynamics on signal controlled arterials. Transportation science, nov 80, p 365-396.

MORALES, J. et al (1985) Two-lane traffic simulation : a field simulation of ROADSIM. Public Roads, vol 49, # 3, dec 85, p 95-104.

Nedler, J. et al (1965) A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal, 7, 308, 1965.

NEMETH, Z. et al (1970) Investigation of the dynamics of platoon dispersion. Highway research record, #334 1970, p 23-33.

PACEY, G. (1956) The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal. RRL Research note, # RN/2665/GMP, Road Research Labora-tory, 1956 (Unpublished).

RADELAT et al (1980) Capacity and Quality of Flow on Urban Arterials. Publics Roads, june 1980, p. 35-43.

ROBERTSON, D.I. (1968) "TRANSYT" Traffic Network Study Tool. Quatrieme symposium sur la theorie de la circulation, Karlsruhe, 1968, p 135-144.

ROBERTSON, D.I. (1969) TRANSYT: a traffic network study tool. Road Research Laboratory, report LR 253, 37 p.

ROBERTSON, D.I. (1984) Measuring and analysing cyclic flow profiles with a portable microcomputer. Traffic Eng. & Control, janvier 1984, p. 27-28.

RUMSEY, A.F. et al (1972) Simulation of a pair of intersections. Traffic Engineering & Control, march/april 72 p 522-525.

SALTER, R.J. (1974) The prediction of the dispersion of traffic platoons downstream of signals. Highway Traffic Analysis and Design, p 352-353.

SEDDON, P. A. (1971) Another look at platoon dispersion : 1-The kinematic wave theory. Traffic Engineering & Control, dec 71, p 332-336.

SEDDON, P. A. (1972) Another look at platoon dispersion : 2- The diffusion theory. Traffic Engineering & Control, jan 72, p 388-390.

SEDDON, P. A. (1972) The prediction of platoon dispersion in the combination methods of linking traffic signals. Transportation research, june 72, p 125-130.

SEDDON, P.A. (1972) Another look at platoon dispersion : 3-The recurrence relationship. Traffic Engineering & Control, feb 72, p 442-444.

SMELT, J.M. (1984) Platoon Dispersion Data Collection and Analysis, Proc., Annual Meeting of the Australian Road Research Board, Vol 12, Part 5, p. 71-86.

STREETER, V. et al (1975) Fluid Mechanics. McGraw-Hill Book company, N.Y. 1975, 737 p.

SYMPHONY (VERS1.2, 1986) Lotus Development Corporation. 55 Cambridge Parkway, Cambridge, USA.

TANDY 102 Applications and BASIC Reference Guide (1985) Cat. No. 26-3803, Tandy corporation, Barrie, Ontario, Canada.

TANDY 102 Owner's Manual (1985) Cat. No. 26-3803, Tandy corporation, Barrie, Ontario, Canada.

TARNOFF, P.J. et al (1981) Selecting traffic signal control at individual intersections. National Cooperative Highway Reserach Program Report, NCHRPR 233 june 1981, p 1-49 et p 125-129

TRACZ, M. (1975) The prediction of platoon dispersion based on rectangular distribution of journey time. Traffic Engineering & Control, nov 75, p 490.

TRAFFIC ENGINEERING HANDBOOK (1950), Institute of Traffic Engineers, New Haven, Connecticut, 1950.

TREITERER, J. et al (1973) Effect of signal spacing on platoon dispersion, Final report: EES 311. Transportation Research Center Ohio state University, Colombus, Ohio, july 1973.

VECELLIO, R. et al (1970) Investigation of the dynamics of platoon dispersion. Highway research record, #334 1970, p 23-33.

VECELLIO, R. (1976) Platoon dispersion characteristics on one-way signalized arterials. Transportation Research Record # 597, 1976, p 42-43.

WALLACE, G. E. et al (1981) TRANSYT - 7F USER'S Manual. FHWA.

WARDROP, J. (1952) Some Theorical Aspectsof of Road Traffic Research. Proceedings of the Institute of civil Engineers.

WOOD, K. (1986) Measuring saturation flow at traffic signals using a handheld microcomputer. Traffic Engineering & Control April 1986. p 174-175.

LISTE DES ANNEXES

A DYNAMIQUE DU MODELE DE ROBERTSON

B DETERMINATION DE LA TAILLE DE L'ECHANTILLON

C CHOIX ET UTILISATION DE L'ORDINATEUR PORTATIF

D ELABORATION DU MODELE CALIBRA

E DONNEES DE L'EXPERIENCE SUR LE PREMIER SITE

ANNEXE A

La dynamique du modèle de Robertson

La dynamique de la formule peut se comprendre en simplifiant un exemple tiré de SALTER (1974). Les données du problème se présentent comme suit:

- le débit à la ligne d'arrêt se dissipe uniformément à raison d'un (1) véhicule par intervalle.
- la durée du feu vert est de 5 intervalles
- le temps de parcours du véhicule en tête du peloton pour atteindre le second point d'observation est de 8 intervalles.
- le facteur de dispersion alpha est de 0,5, F est donc 0,8.

La construction du profil prédit à partir du profil à la ligne d'arrêt (voir figures 1.7a et 1.7b au chapitre 1) peut s'effectuer à l'aide du tableau A1.

Le débit du premier intervalle q(1) du profil à la ligne d'arrêt est multiplié par le facteur F. On obtient alors le débit du premier intervalle du profil prédit q'(1+t) .

Le débit du second intervalle est obtenu de la même façon sauf qu'on lui additionne le débit de l'intervalle précédent q'(i+t-1) . On répète cette étape pour les débits subséquents en additionnant à chaque intervalle du profil prédit le débit de l'intervalle précédent.

La valeur du débit prédit tend vers 0 lorsque le nombre d'intervalles tend vers l'infinie. Cette procédure a valu le nom de méthode de récurrence au modèle de Robertson.

Comme on peut le constater par le format du tableau, l'utilisation d'un logiciel de type tabuleur est tout indiqué pour l'informatisation de ce modèle.

TABLEAU A.1

Utilisation du modèle de Robertson

INTERVALLE (i)	DEBIT A LA LIGNE D'ARRET q(i)	APPLICATION DU MODELE	DEBIT PREDIT q'(i+t)
1	1		
2	1		
3	1		
4	1		
5	1		
6			
7			
8			
9		Fq(1)	=0,2
10		Fq(2)+(1-F)q'(9)	=0,36
11		Fq(3)+(1-F)q'(10)	=0,49
12		Fq(4)+(1-F)q'(11)	=0,59
13		Fq(5)+(1-F)q'(12)	=0,67
14		Fq(6)+(1-F)q'(13)	=0,54
15		Fq(7)+(1-F)q'(14)	=0,43
16		Fq(8)+(1-F)q'(15)	=0,34
.		. . . .	.
.		. . . .	.
ϖ		Fq(ϖ)+(1-F)q'(ϖ+t-1)	=0

Le débit prédit par intervalle peut alors être utilisé pour coordonner deux feux de façon à minimiser les retards au carrefour.

ANNEXE B

DETERMINATION DE LA TAILLE DE L'ECHANTILLON

Les résultats obtenus à partir de l'analyse de l'échantillon recueilli doivent se comparer à ceux qu'on obtiendraient si l'analyse portait sur la population en entier. La taille de l'échantillon minimum nécessaire à l'estimation de la moyenne de sa population pour un niveau de confiance approprié, dépend toutefois de l'erreur tolérée sur la moyenne de la population:

$$X = \mu \pm e$$

où

X = moyenne de l'échantillon

μ = moyenne de la population

e = erreur tolérée sur la moyenne

Le niveau de confiance nous indique la probabilité que la différence entre les moyennes de l'échantillon et de la population soit plus petite ou égale à l'erreur e. En général, on évalue l'erreur avec une probabilité de 95%:

$$p(\mu - e < X < \mu + e) = .95$$

- Détermination de l'erreur

La distribution de la moyenne de l'échantillon X est sup-

posée normale. On transforme le système $\mu=0$ et $\sigma=1$ pour obtenir la distribution standard.

$$z = (X-\mu)/(\sigma/\sqrt{n})$$

En isolant la moyenne de l'échantillon X:

$$X = z(\sigma/\sqrt{n}) + \mu$$

où le terme $z(\sigma/\sqrt{n})$ représente l'erreur tolérée «e» sur la moyenne de la population.

$$e = z(\sigma/\sqrt{n})$$

En isolant la taille de l'échantillon «n»:

$$n = z^2\sigma^2/e^2$$
$$= (z\sigma/e)^2$$

En considérant un niveau de confiance de 95%:

$$n = (2\sigma/e)^2$$

En informatisant cette formule et en simulant pour un intervalle de confiance de 95% et 4 différentes erreurs tolérées (2,5%, 5%, 10% et 20%), la taille de l'échantillon n peut être déterminée à partir du graphique présenté à la figure 4.3 du chapitre 4.

ANNEXE C

Choix de l'ordinateur portatif

Pour l'enquête, cinq ordinateurs portatifs ont été examinés. Les caractéristiques techniques de ces ordinateurs sont présentées au tableau C.1.

Tableau C.1
Description technique de cinq ordinateurs portatifs.

CARACTERISTIQUES	TOSHIBA T1100	IBM PC CONVERTIBLE	HP PORTABLE	ZENITH Z-181	TANDY 102
Mémoire	640 k	512 k	1.2 m	640 k	32 k
Disque (3 1/2)"	2	2	2 (externe)	2	1 (externe)
Ecran	80x25	80x25	80x25	80x25	40x8
Horloge	oui	oui	oui	oui	oui
Sorties (I/O)	Parallèle Série	Parallèle Série	Série Para. (opt)	Parallèle Série	Parallèle Série
Poids (lbs)	10	11	8.5	11.8	4
Dimensions (po)	12X12X3	15X12X3	13x10x3	13x12x3	12x8x1.5
Prix ($US)	1999(256k) 2399(640k)	1995(256k) 2385(512k)	2695(512k) 2995(512k) 5785(1.2m)	2399 (640k)	550 (32k)

Puisque que le TANDY 102 est le moins dispendieux des ordinateurs portatifs et que ses caractéristiques respectent les critères de base (maniabilité, communication, capacité mémoire pouvant supporter des programmes d'environ 1000 lignes, possibilité de brancher une unité portative de disques), nous l'avons retenu pour l'enquête.

1- Description du programme de comptage utilisé par l'ordinateur portatif.

Le programme a été écrit en langage BASIC. Il est présenté à la figure C.1 dans une version simplifiée afin d'en faciliter la compréhension. Quatre touches du clavier sont utilisées pour la saisie des données. Les trois premières correspondent au type de véhicules (auto, bus, camion) alors que la dernière indique le début du feu vert au carrefour; c'est-à-dire le moment où le peloton démarre. Ainsi, chaque fois que l'utilisateur appuie sur une des trois premières touches, le programme enregistre simultanément dans la mémoire de l'ordinateur le type de véhicule et son temps de passage.

Les touches choisies sont disposées de façon à faciliter le mouvement des doigts, minimisant ainsi les fautes de frappe. Des collants mnémotechniques sont apposés sur les touches à utiliser pour en faciliter l'identification. Toutes les autres touches sont bloquées par le programme. Lorsque l'usager appuie involontairement sur l'une d'entre elles, l'ordinateur indique l'erreur à l'usager par l'émission d'un signal sonore.

Différentes modifications peuvent être apportées au programme dans le but d'augmenter ses possibilités de validation ou de cueillette. Par exemple, on peut y insérer une routine permettant de corriger les fautes de frappe. On peut également augmenter le nombre de classes de véhicules à

recueillir. Ces détails ont été éliminés de la figure C.1 afin de faire ressortir plus clairement la structure du programme.

Figure C.1
Programme utilisé pour la cueillette des données.

```
CHARGEMENT ET EXECUTION DU PROGRAMME "COMPTAGE"

010 IPL"COMPTAGE.BA" : OPEN "RAM:A.DO"FOR OUTPUT AS 1
020 CLS: PRINT @161,"Presser la touche [ENTER]  pour commencer . . ."
030 A$=INKEY$:IF A$=""THEN PRINT@229,TIME$:GOTO 30

IMAGE SUR L'ECRAN

040 CLS : PRINT@80,"CYCLE   TEMPS   AUT BUS CAM"
050 LINE(182,12)-(238,59),1,BF : LINE(85,28)-(162,50),1,B
060 LINE(0,28)-(30,50),1,B : LINE(37,28)-(78,50),1,B

PROGRAMME PRINCIPAL

070 V$=INPUT$(1)
080 IFV$="1"THEN A1=1:GOTO140
090 IFV$="2"THEN B1=1:GOTO140
100 IFV$="3"THEN C1=1:GOTO140
110 IFV$="6"THEN T3=VAL(RIGHT$(TIME$,2))+VAL(MID$(TIME$,4,2))*60:IFA=0
    THEN CL=CL+1:A=A+1:GOTO140 ELSE A=0:GOTO140
120 IF V$="0" THEN CLOSE 1:CALL 59400
130 BEEP:GOTO 70

IMPRESSION DES VALEURS SUR L'ECRAN

140 PRINT @114,CL : PRINT @271,TIME$ : PRINT @161,CL : PRINT @175,A1 : PRINT @179,B1
150 PRINT @183,C1 : T3=VAL(RIGHT$(TIME$,2))+VAL(MID$(TIME$,4,2))*60 : PRINT @167,T3

STOCKAGE DES VALEURS DANS LE FICHIER #1

160 IF V$="6" THEN PRINT#1,   CL;"   ";A1;"   ";B1;"   ";C1;" ";T3;" ";TIME$ ELSE
    PRINT#1,CL;"   ";A1;"   ";B1;"   ";C1;" ";T3
170 B2=B2+B1 : C2=C2+C1 : A2=A2+A1 : C1=0 : B1=0 : A1=0

IMPRESSION DES VALEURS CUMULEES SUR L'ECRAN

180 PRINT @215,A2 ; PRINT @219,B2 ; PRINT @223,C2 ; PRINT @192,FRE(0)
190 PRINT @0,"
200 IF FRE(0)<=2500 THEN BEEP:PRINT @0,"***ATTENTION*** --> SAUVEZ LES DONNEES!"
210 GOTO 70


STOCKAGE DES VALEURS CUMULEES DANS LE FICHIER #1

220 PRINT#1,CL;"   ";A2;"   ";B2;"   "; C2
230 CLOSE 1 ; CALL 59400
```

L'image de l'écran a été conçue sous forme de tableau donnant à l'observateur les informations suivantes:

1- le cycle en cours;
2- la touche qu'il vient de presser pour identifier un véhicule (auto, bus, camion);

3- le temps de passage de ce véhicule;
4- les comptages cumulatifs pour chacune des classes de véhicules;
5- l'espace-mémoire disponible;
6- l'heure.

Un format de sortie des données peut être spécifié à l'intérieur du programme de l'ordinateur portatif. On évite ainsi le besoin de recourir à un programme supplémentaire pour la réorganisation des données. Une fois transmises sur un ordinateur plus puissant, les données pourront être utilisées immédiatement par le logiciel d'analyse. Toutefois, cette pratique implique une plus grande consommation de l'espace-mémoire de l'ordinateur portatif lors du stockage des données.

Par exemple, dans le programme présenté ici, lorsque l'utilisateur appuie sur une touche indiquant un type de véhicule, quatre informations sont stockées en mémoire: les trois types de véhicules (100 ou 010 ou 001) et le temps de passage (tableau C.2). Ce format a été utilisé pour le transfert direct des données dans le logiciel SYMPHONY.

On peut modifier ce format afin d'obtenir deux informations: un type de véhicule (A ou B ou C) et son temps de passage. Ce dernier format minimise l'espace utilisé dans la mémoire. Par contre, une réorganisation des données doit s'effectuer après le transfert, en fonction du logiciel utilisé pour l'analyse. On doit alors écrire un programme supplémentaire pour accomplir cette tâche, ce qui alourdit la procédure dans son ensemble.

Le tableau suivant présente le format d'entrée des données qui est transmis à l'ordinateur personnel ou central. Les chiffres en tête de colonne représentent le numéro du cycle alors que les lettres A, B et C désignent la classe de véhicules (auto, bus, camion).

Tableau C.2
Format de sortie des données.

83				84				85				86				87			
A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS	A	B	C	TEMPS
0	0	0	2762	0	0	0	2832	0	0	0	2902	0	0	0	2972	0	0	0	3042
1	0	0	2775	1	0	0	2845	1	0	0	2914	1	0	0	2984	1	0	0	3055
1	0	0	2776	1	0	0	2846	1	0	0	2915	1	0	0	2986	1	0	0	3055
1	0	0	2778	1	0	0	2847	1	0	0	2916	1	0	0	2988	1	0	0	3057
1	0	0	2779	1	0	0	2847	1	0	0	2917	1	0	0	2989	1	0	0	3058
1	0	0	2782	1	0	0	2848	1	0	0	2918	1	0	0	2989	1	0	0	3058
1	0	0	2783	1	0	0	2848	1	0	0	2920	1	0	0	2990	1	0	0	3058
1	0	0	2787	1	0	0	2848	1	0	0	2920	1	0	0	2991	1	0	0	3059
1	0	0	2789	1	0	0	2854	1	0	0	2923	1	0	0	2994	0	0	1	3063
1	0	0	2792	1	0	0	2854	0	0	1	2925	1	0	0	2995	1	0	0	3064
1	0	0	2795	1	0	0	2857	1	0	0	2931	1	0	0	2999	0	0	1	3065
1	0	0	2795	1	0	0	2860	1	0	0	2932	1	0	0	3000	1	0	0	3066
0	0	1	2801	1	0	0	2861	1	0	0	2932	1	0	0	3000	1	0	0	3067
0	0	1	2805	1	0	0	2861	1	0	0	2932	1	0	0	3001	1	0	0	3071
				1	0	0	2862	1	0	0	2933	1	0	0	3002	1	0	0	3071
				1	0	0	2864	1	0	0	2934	1	0	0	3002	1	0	0	3073
				1	0	0	2864	1	0	0	2935	1	0	0	3003	1	0	0	3074
				1	0	0	2864	1	0	0	2938	0	1	0	3004	1	0	0	3075
				1	0	0	2866	1	0	0	2939	1	0	0	3006	1	0	0	3077
				1	0	0	2866	1	0	0	2941	1	0	0	3007	1	0	0	3079
				1	0	0	2867	1	0	0	2942	1	0	0	3007				
				1	0	0	2868					1	0	0	3008				
												1	0	0	3009				
												1	0	0	3012				
13	0	2		23	0	0		21	0	1		24	1	0		18	0	3	

Lorsque la mémoire disponible sur l'ordinateur portatif est insuffisante par rapport à la quantité de données à recueillir, une unité portative de disques est utilisée pour libérer périodiquement la mémoire de son contenu.

Une fois l'étape du transfert sur un ordinateur plus puissant terminée, les données sont groupées par intervalles

de deux secondes (voir tableau C.3).

Tableau C.3
Nombre de véhicules par intervalle de 2 (s) par cycle.

CYCLE	INTERVALLE														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	4	3	2	3	3	1	3	5	2
2	0	0	0	0	1	2	2	3	4	2	0	3	2	2	2
3	0	0	0	0	0	4	0	1	2	4	2	5	3	3	2
4	0	0	0	0	0	0	4	4	1	3	3	2	4	2	2
5	0	0	0	0	0	1	2	3	3	1	3	3	0	4	1
6	0	0	0	0	0	1	3	2	3	4	2	2	3	2	2
7	0	0	0	0	0	1	3	3	4	2	2	4	3	1	3
8	0	0	0	0	0	1	2	1	3	2	4	4	2	3	4
9	0	0	0	0	0	2	1	0	3	4	3	6	3	2	4
10	0	0	0	0	0	1	3	1	2	4	4	3	2	3	3
11	0	0	0	0	0	2	2	1	2	2	3	3	3	1	1
12	0	0	0	0	0	2	1	0	3	3	1	5	2	3	2
13	0	0	0	0	0	0	2	2	1	4	2	2	2	4	3
14	0	0	0	0	0	0	3	3	3	4	3	2	2	1	3
15	0	0	0	0	0	1	2	1	3	2	5	2	4	2	0
TOTAL	0	0	0	5	49	97	114	110	133	124	124	121	119	114	124
MOY.	0	0	0	0	1	2	2.3	2.2	2.7	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.5

A partir du nombre moyen des véhicules calculé pour un intervalle donné, on peut alors obtenir le diagramme de dispersion des pelotons à chacun des points. En comparant les histogrammes observés à ceux simulés, on peut calibrer le modèle de Robertson.

ANNEXE D

DESCRIPTION DU MODELE CALIBRA

La figure D.1 présente le modèle utilisé pour la calibration conçu avec le logiciel SYMPHONY selon l'algorithme séquentiel présenté à la figure 5.3.

Le modèle consiste à un ensemble de 7 modules tous reliés entre eux. La description de ces modules est présentée ci-dessous:

MODULES	FONCTIONS
IDENTIFICATION	Utilisé pour l'entrée du temps de parcours du premier véhicule dans le peloton et pour les simulations avec un facteur alpha particulier.
OBSERVATION	Utilisé pour l'entrée des débits observés par intervalle aux postes de référence et de prédiction.
SIMULATION	Simule les débits du module OBSERVATION avec le modèle de ROBERTSON (1968).
DECALAGE	Fait correspondre le débit de l'intervalle simulé au débit de l'intervalle observé.
KHI-DEUX	Calcul les différences entre les distributions observées et simulées.
ALPHA OPT	détermine le facteur donnant la meilleur représentation de la distribution observee.
GRAPHIQUE	visualise la distribution simulée par rapport à la distribution observée

Pour calibrer le facteur alpha on doit effectuer les opérations suivantes:

- Placer les débits à simuler et à comparer dans le module OBSERVE.
- Mettre le temps du premier véhicule dans le module IDENTIFICATION.
- Spécifier à l'aide d'un incrément la plage des valeurs du facteur alpha à simuler.
- En utilisant une macro commande ou la fonction TABLE du menu du logiciel, l'algorithme détermine le paramètre alpha optimum.
- Avec la commande GRAPH, on obtient une représentation graphique comparant la distribution simulée à la distribution observée.

On répète cette procédure pour la seconde calibration qui consiste à simuler les débits au poste 300 à partir des observations du poste 100. On obtient par la suite le facteur alpha moyen.

FIGURE D.1

MODELE CALIBRA

IDENTIFICATION

Poste	:	2
Peloton	:	45
Temps de parcours du premier véhicule	:	3
Facteur de dispersion "K"	:	0.59
Incrément	:	0.05
Facteur de lissage "F"	:	1/(1+J10*J9)
Indice du KHI-DEUX	:	+L53

MODULES							DETERMINATION DU FACTEUR K OPTIMAL	
OBSERVATION		SIMULATION			DECALAGE	KHI-DEUX	K	KHI-DEUX
i	q1(i) q2(i)	i+t	q2(i+t-1)	q2(i+t)				
		1+J9		0 +J$13*C24+(1-J$13)*624		@IF(J24<>0,(+D24-J24)^2/J24,0)		
1+B24		1+F24	+H24	+J$13*C25+(1-J$13)*625		@IF(J25<>0,(+D25-J25)^2/J25,0)		+L53
1+B25		1+F25	+H25	+J$13*C26+(1-J$13)*626	+H24	@IF(J26<>0,(+D26-J26)^2/J26,0)	0	2.937
1+B26		1+F26	+H26	+J$13*C27+(1-J$13)*627	+H25	@IF(J27<>0,(+D27-J27)^2/J27,0)	@IF(+N26>=1,0,N26+J$11)	2.451
1+B27		1+F27	+H27	+J$13*C28+(1-J$13)*628	+H26	@IF(J28<>0,(+D28-J28)^2/J28,0)	@IF(+N27>=1@OR@N27=0,0,N27+J$11)	2.177
1+B28		1+F28	+H28	+J$13*C29+(1-J$13)*629	+H27	@IF(J29<>0,(+D29-J29)^2/J29,0)	@IF(+N28>=1@OR@N28=0,0,N28+J$11)	1.961
1+B29		1+F29	+H29	+J$13*C30+(1-J$13)*630	+H28	@IF(J30<>0,(+D30-J30)^2/J30,0)	@IF(+N29>=1@OR@N29=0,0,N29+J$11)	1.786
1+B30		1+F30	+H30	+J$13*C31+(1-J$13)*631	+H29	@IF(J31<>0,(+D31-J31)^2/J31,0)	@IF(+N30>=1@OR@N30=0,0,N30+J$11)	1.639
1+B31		1+F31	+H31	+J$13*C32+(1-J$13)*632	+H30	@IF(J32<>0,(+D32-J32)^2/J32,0)	@IF(+N31>=1@OR@N31=0,0,N31+J$11)	1.515
1+B32		1+F32	+H32	+J$13*C33+(1-J$13)*633	+H31	@IF(J33<>0,(+D33-J33)^2/J33,0)	@IF(+N32>=1@OR@N32=0,0,N32+J$11)	1.409
1+B33		1+F33	+H33	+J$13*C34+(1-J$13)*634	+H32	@IF(J34<>0,(+D34-J34)^2/J34,0)	@IF(+N33>=1@OR@N33=0,0,N33+J$11)	1.317
1+B34		1+F34	+H34	+J$13*C35+(1-J$13)*635	+H33	@IF(J35<>0,(+D35-J35)^2/J35,0)	@IF(+N34>=1@OR@N34=0,0,N34+J$11)	1.236
1+B35		1+F35	+H35	+J$13*C36+(1-J$13)*636	+H34	@IF(J36<>0,(+D36-J36)^2/J36,0)	@IF(+N35>=1@OR@N35=0,0,N35+J$11)	1.164
1+B36		1+F36	+H36	+J$13*C37+(1-J$13)*637	+H35	@IF(J37<>0,(+D37-J37)^2/J37,0)	@IF(+N36>=1@OR@N36=0,0,N36+J$11)	1.101
1+B37		1+F37	+H37	+J$13*C38+(1-J$13)*638	+H36	@IF(J38<>0,(+D38-J38)^2/J38,0)	@IF(+N37>=1@OR@N37=0,0,N37+J$11)	1.045
1+B38		1+F38	+H38	+J$13*C39+(1-J$13)*639	+H37	@IF(J39<>0,(+D39-J39)^2/J39,0)	@IF(+N38>=1@OR@N38=0,0,N38+J$11)	0.995
1+B39		1+F39	+H39	+J$13*C40+(1-J$13)*640	+H38	@IF(J40<>0,(+D40-J40)^2/J40,0)	@IF(+N39>=1@OR@N39=0,0,N39+J$11)	0.950
1+B40		1+F40	+H40	+J$13*C41+(1-J$13)*641	+H39	@IF(J41<>0,(+D41-J41)^2/J41,0)	@IF(+N40>=1@OR@N40=0,0,N40+J$11)	0.910
1+B41		1+F41	+H41	+J$13*C42+(1-J$13)*642	+H40	@IF(J42<>0,(+D42-J42)^2/J42,0)	@IF(+N41>=1@OR@N41=0,0,N41+J$11)	0.875
1+B42		1+F42	+H42	+J$13*C43+(1-J$13)*643	+H41	@IF(J43<>0,(+D43-J43)^2/J43,0)	@IF(+N42>=1@OR@N42=0,0,N42+J$11)	0.750
1+B43		1+F43	+H43	+J$13*C44+(1-J$13)*644	+H42	@IF(J44<>0,(+D44-J44)^2/J44,0)	@IF(+N43>=1@OR@N43=0,0,N43+J$11)	0.692
1+B44		1+F44	+H44	+J$13*C45+(1-J$13)*645	+H43	@IF(J45<>0,(+D45-J45)^2/J45,0)	@IF(+N44>=1@OR@N44=0,0,N44+J$11)	0.682
1+B45		1+F45	+H45	+J$13*C46+(1-J$13)*646	+H44	@IF(J46<>0,(+D46-J46)^2/J46,0)	@IF(+N45>=1@OR@N45=0,0,N45+J$11)	0.682
1+B46		1+F46	+H46	+J$13*C47+(1-J$13)*647	+H45	@IF(J47<>0,(+D47-J47)^2/J47,0)	@IF(+N46>=1@OR@N46=0,0,N46+J$11)	0.682
1+B47		1+F47	+H47	+J$13*C48+(1-J$13)*648	+H46	@IF(J48<>0,(+D48-J48)^2/J48,0)	@IF(+N47>=1@OR@N47=0,0,N47+J$11)	0.682
1+B48		1+F48	+H48	+J$13*C49+(1-J$13)*649	+H47	@IF(J49<>0,(+D49-J49)^2/J49,0)	@IF(+N48>=1@OR@N48=0,0,N48+J$11)	0.682
1+B49		1+F49	+H49	+J$13*C50+(1-J$13)*650	+H48	@IF(J50<>0,(+D50-J50)^2/J50,0)	@IF(+N49>=1@OR@N49=0,0,N49+J$11)	0.682
1+B50		1+F50	+H50	+J$13*C51+(1-J$13)*651	+H49	@IF(J51<>0,(+D51-J51)^2/J51,0)	@IF(+N50>=1@OR@N50=0,0,N50+J$11)	0.682
			@SUM(H24..H51)		@SUM(J24..J51	@SUM(L24..L51)	Kopt=	

ANNEXE E

DONNEES DE L'EXPERIENCE SUR LE PREMIER SITE

	Grosseur du peloton	TEMPS DE PARCOURS					
		Premier vehicule	Ecart-type	Peloton	Ecart-type	Dernier vehicule	Ecart-type
	16	3.95	0.72	9.99	0.3	15.95	1.87
P	19	3.96	0.7	10.26	0.34	16.37	2
O	27	3.79	0.65	10.39	0.4	15.79	1.76
S	36	3.45	0.63	10.39	0.25	18.18	1.3
T	43	3.38	0.67	10.39	0.5	18.85	1.35
E	50	4.08	0.82	14.9	0.43	19.92	1.46
	54	4	0.77	15.51	0.23	29.85	2.1
1	61	3.87	0.74	16.05	0.35	30.11	1.88
0	65	3.75	0.64	16.38	0.33	30.35	1.45
0	68	3.74	0.57	16.46	0.27	30.37	1.6
	74	3.7	0.66	16.93	0.29	30.6	1.3
	76	3.71	0.78	16.65	0.32	30.43	0.51
	16	6.82	0.77	12.85	0.46	19.05	1.89
P	19	6.78	0.73	13.07	0.47	19.01	1.49
O	27	6.55	0.89	13.28	0.44	19.81	1.64
S	36	6.28	0.7	13.61	0.36	21.55	1.43
T	43	6.23	0.69	13.93	0.38	22.07	1.14
E	50	6.92	0.82	18	0.23	32.38	2.02
	54	6.85	0.9	18.54	0.27	32.61	1.75
2	61	6.45	0.83	18.95	0.27	32.84	1.4
0	65	6.05	0.49	19.14	0.29	33.05	1.02
0	68	6.07	0.53	19.26	0.3	33.07	0.89
	74	6.1	0.53	19.82	0.31	33.3	0.45
	76	6.14	0.63	19.55	0.32	33.14	0.34
	16	9.36	0.97	15.51	0.51	21.45	1.82
P	19	9.35	0.86	15.75	0.5	21.89	2.17
O	27	9.15	0.85	16.27	0.5	23.15	1.76
S	36	8.87	1.02	16.46	0.44	24.55	1.66
T	43	9.38	1.07	16.82	0.43	25.38	1.64
E	50	9	0.78	20.31	0.28	34	2.66
	54	9.04	0.7	21.1	0.32	34.88	2.29
3	61	8.98	0.85	21.84	0.34	35.47	1.88
0	65	8.9	0.7	22.25	0.36	36.1	1.33
0	68	9.04	0.79	22.41	0.37	36.15	1.26
	74	9.3	0.9	23.11	0.44	36.5	1.02
	76	9.43	0.9	22.81	0.86	36.29	1.03